



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2009

**Helder José Lima
Laranjeira**

**Adaptação de equipamentos a sistemas de
microinjecção de termoplásticos**



**Helder José Lima
Laranjeira**

**Adaptação de equipamentos a sistemas de
microinjecção de termoplásticos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incansável apoio e estímulo durante estes últimos 5 anos.

“O mais importante da vida não é a situação em que estamos, mas a direcção para a qual nos movemos.”

Oliver Wendell Holmes (1809-1894)
Médico/Poeta Norte-Americano

o júri

Presidente

Professor Dr. Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Dr. João Miguel Novais de Amorim da Costa Nóbrega
Professor Auxiliar
Departamento de Engenharia de Polímeros da Escola de Engenharia da
Universidade do Minho

Orientadora

Prof. Dra. Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia
Professora Auxiliar
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Co-orientador

Prof. Dr. Rui António da Silva Moreira
Professor Auxiliar
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer à Prof. Doutora Mónica Oliveira e ao Prof. Doutor Rui Moreira, professores e orientadores, com quem tive o prazer de trabalhar e de ser orientado. Pelo apoio e disponibilidade que sempre ofereceram.

Aos colegas de estudo: Nuno, TB, Francisco, Diogo e Estima. Pelos momentos de boa disposição e de trabalho passados na biblioteca da UA, pela entreajuda existente e por todos estes anos de companheirismo e amizade.

À Vera, pela companhia, compreensão e presença em todos os momentos.

Aos meus pais pela motivação e incentivo durante todo o meu percurso académico. Sem eles chegar até aqui não teria sido possível.

palavras-chave

Unidade redutora, microinjecção, parâmetros de microinjecção

resumo

Como resultado do crescente consumo de micro componentes e sistemas com micro componentes incorporados, a microinjecção de materiais termoplásticos tem vindo a ganhar importância no seio tecnológico e industrial.

Portugal ocupa um lugar cimeiro, a nível mundial, no âmbito da Indústria de Moldes para plásticos. Cada vez mais, grandes multinacionais (indústria automóvel, embalagem, electrónica e telecomunicações, electrodomésticos, etc.) seleccionam empresas nacionais para o fabrico dos seus moldes, destinados a alguns dos melhores produtos de grandes marcas internacionais. Sendo assim, o âmbito e principal objectivo deste trabalho prende-se com o projecto de um mecanismo que possa dotar as máquinas de injecção convencionais de aptidões para realizarem operações de microinjecção. Tal, poderá permitir às empresas nacionais entrarem num novo mercado altamente competitivo, de produção de sistemas cada vez mais miniaturizados.

Este trabalho, que inclui o projecto de um sistema a que foi dado o nome de unidade redutora ou módulo externo de microinjecção, foi realizado e modelado no programa de Desenho Assistido por Computador, CATIA V5. Todas as opções tomadas encontram-se descritas no decorrer do mesmo. As especificações relativas à aquisição e produção de todas as peças constituintes do sistema, incluindo a descrição de todos os possíveis fornecedores dos equipamentos escolhidos e o custo total do módulo externo, são também aqui apresentadas.

Sendo a unidade redutora um sistema de adaptação de máquinas de injecção ditas convencionais (máquinas de injecção horizontais com accionamento hidráulico) com micromolde, e cuja principal função se prende com o controlo do processo de microinjecção nas mesmas, tornou-se pois, fundamental, definir o seu limite de aplicabilidade. Assim, esta poderá ser aplicada a máquinas hidráulicas que possuam um diâmetro máximo do fuso até 60 mm e cuja pressão hidráulica seja igual ou superior a 140 bar. A parametrização do sistema teve em conta os parâmetros de injecção que a unidade redutora pode proporcionar. Nomeadamente: pressão de injecção igual a 2200 bar; velocidade de injecção igual a 909,1 mm/s; temperatura máxima de plasticização de 400 °C; volume de injecção igual a 2,934 cm³.

keywords

Reduction unit, microinjection molding, microinjection parameters, two-stage injection units.

abstract

As a result of the growing consumption of microcomponents and micro embedded component systems, the microinjection of thermoplastic materials has been gaining importance in the middle of the technological and industrial field.

Portugal has a leading role in the world, within the Industry of molds for plastics. Increasingly, large multinational companies (automotive, packaging, electronics and telecommunications, electrical, etc.) select national companies for the manufacture of their molds, to some of the best products for major international brands. Thus, the scope and main objective of this work is to design a mechanism that can provide the conventional injection molding machines, the ability to conduct operations of microinjection, which could enable national companies to enter in a new and highly competitive market, which is the production of miniaturized systems.

This work includes the project of a system to which was given the name of reduction unit or external microinjection module. It was modeled in Computer Aided Design (CAD) software, CATIA V5. All choices made are described in the course of the work. The set of specifications for the acquisition and production of all parts, including all possible suppliers for the equipment chosen and the unit price of each one and the external module cost, is also here presented.

Knowing that this reduction unit is a system to be adapted between conventional injection molding machines, (i.e. horizontal injection machines with hydraulic drive) and a micromold, and whose function is to control the process of microinjection. This external module was developed to be applied to hydraulic injection machines having a maximum screw diameter of 60 mm and where the hydraulic pressure is equal to or greater than 140 bar. This parameterization took into consideration the injection parameters that reduction unit can provide. Namely: injection pressure equal to 2200 bar; injection speed equal to 909,1 mm/s; maximum melting temperature of 400 °C; injection volume equal to 2,934 cm³.

Índice de conteúdos

1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objectivos.....	1
2. Revisão do estado da arte	2
2.1. Moldação por injeção	2
2.2. Máquinas de injeção convencionais.....	5
2.3. Microinjeção de termoplásticos	7
2.3.1. Máquinas de microinjeção	11
2.3.2. Materiais aplicados em microinjeção	14
2.3.3. A importância da microinjeção	15
2.3.4. Módulos externos de controlo de injeção	16
3. Análise das condições iniciais do equipamento receptor	18
3.1. Apresentação da máquina injectora.....	18
3.2. Determinação da carga de injeção mínima.....	20
3.3. Análise dos subsistemas disponíveis	23
3.3.1. Bomba hidráulica existente e sua capacidade.....	23
3.3.2. Acoplamentos possíveis	24
4. Anteprojecto do sistema em desenvolvimento	25
4.1. Apresentação do sistema proposto.....	25
4.2. Pré-dimensionamento de variáveis de projecto	28
4.2.1. Volume de injeção	28
4.2.2. Pressão de injeção.....	29
4.2.3. Temperatura de plasticização.....	30
4.2.4. Velocidade de injeção	30

4.3.	Dimensionamento das variáveis do cilindro hidráulico	32
4.4.	Projecto e desenvolvimento da unidade redutora	35
4.4.1.	Elementos funcionais	35
4.4.2.	Elementos de accionamento	43
4.4.3.	Elementos estruturais de montagem	47
4.4.4.	Material aplicado	51
4.4.5.	Conjunto final	53
5.	Caderno de Encargos	56
6.	Conclusões e trabalho futuro	60
7.	Referências	64
8.	Anexos	66

Índice de figuras

Figura 1: Processo de injeção de termoplásticos.....	3
Figura 2: Máquina de injeção de termoplásticos convencional	7
Figura 3: Processo de microinjeção de termoplásticos.....	9
Figura 4: Gráfico de variação de temperatura do molde num processo variotérmico.....	11
Figura 5: Exemplo de máquina de microinjeção.....	13
Figura 6: Imagem ilustrativa de uma máquina de injeção convencional, antes e depois, de lhe ser instalada a unidade redutora.....	26
Figura 7: Esquema do processo de injeção e de funcionamento das válvulas, de pino e rotacional, no bloco quente.	27
Figura 8: Evolução da pressão em função da velocidade de injeção	31
Figura 9: Corte esquemático do bloco quente.....	36
Figura 10: Identificação de r_1 e r_2	39
Figura 11: Identificação de r_3 e r_4	40
Figura 12: Célula de carga e respectivo sistema de fixação	43
Figura 13: Perspectiva explodida do sistema de accionamento e controlo do êmbolo de injeção	44
Figura 14: Perspectiva explodida do sistema de controlo da válvula de pino	45
Figura 15: Perspectiva explodida do sistema de controlo da válvula rotacional	47
Figura 16: Placa de suporte modelada.....	48
Figura 17: Placa de topo modelada	49
Figura 18: Placa móvel e seu sistema de guiamento	50
Figura 19: Placa de aperto	51
Figura 20: Apresentação do resultado da montagem de todos os componentes constituintes da unidade redutora/módulo de microinjeção	54
Figura 21: Unidade redutora/módulo externo de microinjeção.....	55
Figura 22: Gráfico representativo da percentagem de custo associada a cada grupo de equipamentos.....	59
Figura 23: Unidade redutora com material aplicado (1).....	66
Figura 24: Unidade redutora com material aplicado (2).....	66

1. Introdução

1.1.Motivação

O facto das técnicas de injeção de termoplásticos já serem bem conhecidas e aplicadas, permite a produção de variadíssimos componentes, desde elementos aplicados na indústria automóvel à indústria electrónica. A miniaturização destes é um passo viável para a evolução das tecnologias, onde um maior número de funções é integrado num espaço cada vez mais reduzido.

A produção de componentes à escala micro, promete assim revolucionar e aumentar sobremaneira a competitividade da grande maioria dos sectores produtivos.

A investigação e desenvolvimento na área temática da moldação por microinjecção pretende abordar estas questões no contexto da indústria de moldes portuguesa, um importante sector na economia do país, e criar novas oportunidades de negócio, pela abertura de novos mercados, utilizando o equipamento já existente.

1.2.Objectivos

O presente trabalho pretende adaptar a tecnologia de moldação por injeção de termoplásticos à escala micro, inferindo, portanto, algumas alterações ao processo, que se pretende manter cíclico. Assim, a estrutura moldante e os sistemas funcionais do molde convencional mantêm-se, permitindo a utilização, também, dos equipamentos de injeção tradicionais.

É objectivo deste trabalho, a concepção e desenvolvimento de uma unidade redutora de injeção de termoplásticos para adaptação dos sistemas de macro a micro injeção.

Pretende ainda levar-se a efeito a elaboração de um caderno de encargos, relativo às soluções de adaptação propostas.

2. Revisão do estado da arte

2.1. Moldação por injeção

O termo moldação por injeção é uma descrição simplificada de um processo bastante complicado, que é controlado dentro de limites específicos. O plástico derretido ou plasticizado é mantido neste estado até que seja removido, já num estado sólido, replicando a forma dada pela placa das cavidades do molde. Este pode ser constituído apenas por uma cavidade ou por várias cavidades semelhantes ou diferentes entre si, cada uma delas ligada a um sistema de alimentação através de canais de alimentação, que levam directamente o fluxo de plástico plasticizado a cada cavidade. Este processo é considerado como um dos métodos mais económicos de produzir um único componente em larga escala [1].

Podem-se distinguir três operações básicas neste processo (ver Figura 1):

1. A subida da temperatura do plástico até um ponto em que ele flua sob pressão. Este processo é normalmente feito aquecendo e agregando de forma simultânea o plástico (em forma sólida granular), até que este se plasticize a uma temperatura elevada e uniforme e também a uma viscosidade uniforme. Isto é conseguido no cilindro das máquinas de injeção de plástico, que estão equipadas com um parafuso alternativo (sem-fim). Este proporciona o trabalho mecânico necessário e também o aquecimento do material. Esta parte do processo tem o nome de plasticização do material.
2. Permitir que o plástico solidifique no molde, o qual fica fechado por acção da própria máquina. O fluido, ou seja, o plástico fundido proveniente do cilindro de injeção da máquina, é transferido por vários canais de alimentação para as cavidades do molde onde é finalmente moldado de acordo com a forma do objecto desejado, forma essa que é dada pelas características implementadas na placa das cavidades e na placa das buchas. O que torna esta operação aparentemente simples, em algo realmente complexo, são as limitações do circuito hidráulico usado na actuação do fuso de injeção e os complicados canais de enchimento e alimentação envolvidos no preenchimento do molde e o arrefecimento que é necessário implementar ao próprio molde.

3. A abertura do molde para extrair a peça, após se ter mantido o material confinado sob pressão, tal como o calor (que foi adicionado ao material para o plasticizar) que é necessário retirar para que o plástico solidifique e para que este fique permanentemente com a forma que é desejada [1].

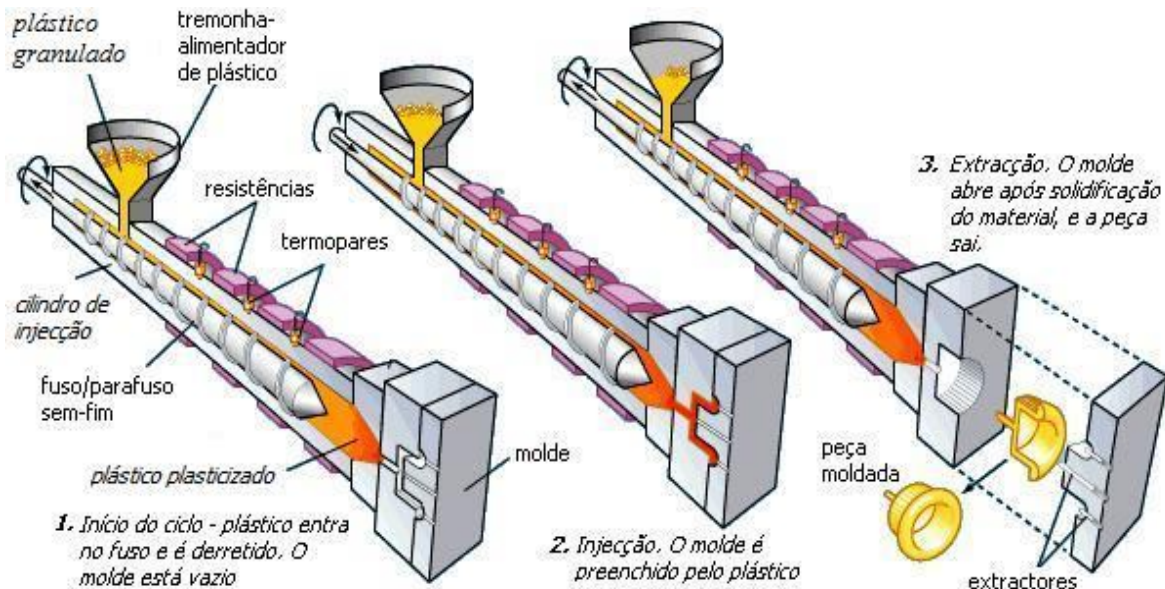


Figura 1: Processo de injeção de termoplásticos, adaptado de [2]

É neste momento em que os inputs mecânicos e térmicos do equipamento de injeção devem ser definidos, de forma a responderem às características de processamento do plástico que será utilizado. Estas três fases são consideradas as principais, bem como as mais determinantes para a produtividade do processo, uma vez que a velocidade deste dependerá: no quão rápido se pode aquecer o plástico até à temperatura óptima de moldação; no quão rápido se pode fazer a injeção do material; e no tempo que é necessário para arrefecer o material no interior do molde [1].

Existem outras operações no processo de injeção, tais como fecho do molde, extracção da peça e alimentação da máquina que são também importantes. A velocidade com que são realizadas irá afectar a produtividade do processo, e o seu efeito irá depender de outros factores (sem serem os que estão em causa aquando o processamento do material), como por exemplo, a parte de anteprojecto de todo o sistema de injeção. De referir que todo o processo é feito ciclicamente, uma vez que após a extracção da peça o

fuso da máquina começa a rodar, transportando o material fundido para o próximo ciclo de injeção [3].

A matéria-prima é habitualmente adquirida na forma granular e é aquecida na câmara de aquecimento e injeção até que atinja um estado viscoso, no qual pode ser forçada a deslocar-se para as cavidades do molde. Cada plástico difere na sua capacidade de fluir sob pressão e calor. Para se atingir o melhor resultado, devem ser determinados previamente alguns parâmetros do processo, tais como: a temperatura de fusão correcta, a pressão de injeção e a velocidade de enchimento do molde; estes, têm de ter em conta as especificidades do material e do molde a utilizar. Algumas condições de moldação necessitam que ambas as variáveis, pressão de injeção e velocidade de injeção, variem durante o processo de enchimento. Um plástico que seja sensível ao calor pode ficar degradado se for usada uma taxa de enchimento demasiado rápida. Forçar o plástico através dos orifícios a uma velocidade muito alta, pode aumentar a tensão de corte e a temperatura, de tal modo que pode ser suficiente para causar sobreaquecimento e a consequente queima do mesmo. Contudo, peças relativamente finas necessitam de uma rápida taxa de enchimento para prevenir o arrefecimento do plástico antes que a cavidade seja preenchida correctamente. Requisitos exigentes como estes, necessitam de uma versatilidade considerável na parte de projecto da unidade de injeção. A programação de diferentes velocidades e pressões de injeção durante o avanço do parafuso ou do êmbolo, ajuda bastante no preenchimento correcto das cavidades do molde. Em algumas máquinas, esta programação ou existência de multi-estágios de injeção, já vem definida como característica normalizada, o que traduz realmente o grande trabalho de investigação científica que vem sendo feito nesta área [3].

A unidade de fecho de uma máquina deve exercer uma força suficientemente elevada de forma a resistir à tendência do movimento do material plasticizado a altas pressões, forçando as duas partes do molde uma contra a outra. Se estas duas superfícies em contacto sofrerem um ligeiro afastamento, mesmo que sejam apenas fracções de milímetro, o plástico contido no interior do molde irá fluir através dessa área de contacto. A dimensão dos moldes utilizados está directamente relacionada com a unidade de fecho,

uma vez que as forças aplicadas nesta operação dependem da área projectada dos mesmos, evitando a existência de fugas de plástico.

2.2.Máquinas de injeção convencionais

Existem muitos tipos de máquinas de injeção, que permitem por sua vez, produzir inúmeros tipos de peças de forma económica. Existem no mercado equipamentos de diferentes dimensões, oferecendo vantagens tanto os maiores como os mais pequenos, dependendo da função que lhes será solicitada realizar. Por exemplo, se várias máquinas pequenas são usadas em vez de um menor número de grandes, uma eventual avaria ou paragem para manutenção terá menos efeito nas taxas de produção.

No contexto deste trabalho, referem-se como máquinas de injeção convencionais, as máquinas horizontais com accionamento hidráulico.

Assim, este tipo de equipamento, genericamente, possui quatro unidades principais:

- unidade de potência;
- unidade de injeção;
- unidade de fecho;
- unidade de comando.

A primeira unidade é a responsável por transmitir energia aos actuadores da máquina que vão sendo accionados. Designam-se por actuadores todos os cilindros e motores hidráulicos que garantem o movimento dos vários órgãos da máquina. Esta unidade está baseada num sistema hidráulico accionado por um motor eléctrico.

A unidade de injeção incorpora um sistema que é composto por um cilindro dividido em quatro secções, estando a mais quente junto ao molde, mas não isolada de modo a permitir que os gases se escapem para a atmosfera envolvente. Esta unidade, alimentada pela unidade de potência possibilita o transporte, aquecimento, plasticização e homogeneização do polímero, desde o sistema de alimentação até ao bico de injeção situado no interior do molde. É também, a unidade responsável pela repetitividade do processo.

A unidade de fecho permite fixar o molde à máquina, isto é, deve ser capaz de manter o molde fechado aquando da fase de injeção, suportando as pressões geradas

durante a mesma, bem como, permitir a abertura do molde aquando a extracção das peças injectadas.

A unidade de comando é, tal como o nome o indica, a unidade que permite controlar as operações a executar através da monitorização das diversas variáveis do processo. Esta estabelece também a interface entre o operador e a máquina, em tempo real, e pode ser controlada remotamente [1].

Para além destas unidades, o molde é a ferramenta fundamental deste processo, conferindo ao polímero injectado a sua forma final. É ele o responsável por receber o material, permitir o escape dos gases aquando a fase de enchimento, arrefecer o polímero permitindo que este solidifique no seu interior e extrair a peça no final do processo. Por vezes é necessário adicionar ao molde, insertos. A palavra *inserto* tem dois significados distintos e pode aplicar-se em duas situações diferentes, nomeadamente: na construção de moldes e nas operações de moldação. O primeiro caso refere-se a peças de difícil maquinação como sendo partes integrantes da cavidade moldante. Estas são maquinadas separadamente a partir de aço, ou a partir do mesmo material aplicado à cavidade do molde, e são instaladas/inseridas na posição desejada, vindo então a fazer parte do próprio molde. Muitas vezes, são referidas como sendo insertos cavidade ou insertos bucha. Este tipo de inserto é também usado quando é necessária a substituição de secções do molde que possam ter partido ou que estejam danificadas. O segundo grupo de insertos não são peças que integram o molde em si, mas sim peças separadas, que são inseridas no mesmo e que vêm a fazer parte do resultado final da injeção após o material estar solidificado em torno do inserto. Insertos deste tipo são normalmente feitos a partir de bronze, cobre, alumínio ou aço. Por vezes prata ou outros materiais preciosos podem ser utilizados em insertos com aplicações no ramo da electrónica [1]. Na Figura 2 apresenta-se um exemplo do que aqui se entende por máquina de injeção convencional.

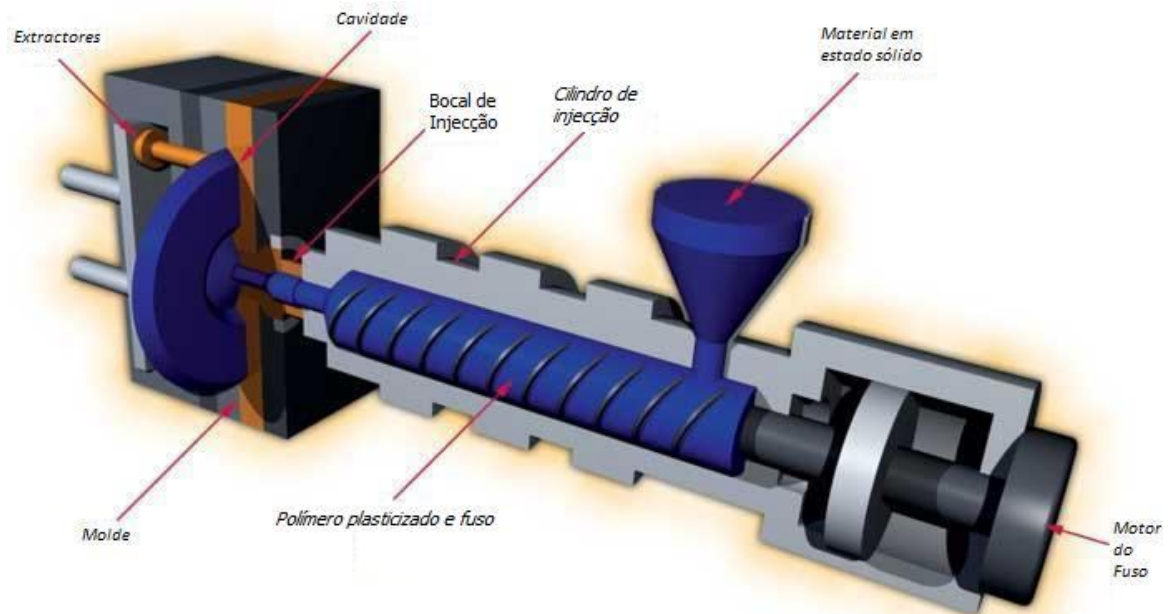


Figura 2: Máquina de injeção de termoplásticos convencional, adaptado de [4]

2.3. Microinjecção de termoplásticos

A micromoldação de termoplásticos é uma das técnicas de fabrico de micro componentes não-electrónicos mais promissoras. Assim que o inserto esteja pronto, várias centenas de peças podem ser produzidas num só molde e com pouco esforço. Normalmente o custo de fabricação destas peças é relativamente baixo, porque apenas é necessária uma pequena quantidade de material [5].

O desenvolvimento da micromoldação de termoplásticos começou há cerca de 30 anos. Desde aí, muita experiência e conhecimento foram alcançados, o que faz com que hoje, as máquinas de micromoldação estejam disponíveis comercialmente e sejam usadas usualmente na indústria [6].

Existem várias definições para aquilo que constitui um produto fabricado por micromoldação. Assim, dependendo da área de interesse, podem-se considerar três tipos de micropeças:

- peças que possuem um peso de poucos miligramas;
- peças que possuem características dimensionais na gama de valores do micrómetro;

- peças que tenham a si associadas tolerâncias dimensionais na ordem do micrómetro, não implicando qualquer limite dimensional [5].

Como consequência, a microinjecção aparece como um dos processos mais adequados para a replicação de microestruturas em médias e altas escalas de produção.

A maior dificuldade em produzir este tipo de peças prende-se com o facto de que a razão de aspecto (ou dimensão específica), definida como a razão entre a espessura e o comprimento da peça, seja geralmente superior à unidade. Este é assim um dos principais requisitos, se não o principal, no processo de microinjecção e é devido aos valores exigidos na razão de aspecto, que todo o processo tem de ser controlado dentro de parâmetros e limites específicos muito rigorosos. Assim, a espessura das peças não pode ser desprezada no que diz respeito às outras dimensões, como acontece na moldação por injecção convencional [5].

Existem vários processos de moldação, tais como: a gravação a quente (*hot embossing*), a moldação por microinjecção (μ IM), a moldação por injecção radioactiva, a moldação por injecção de compressão e a termo-formação, que são usados para a produção de micropeças de termoplásticos.

Os processos de moldação por microinjecção e gravação a quente parecem ser os mais viáveis a nível industrial, usados para a moldação destas micropeças. Como este trabalho apenas recai no estudo do primeiro, descrever-se-ão as suas funcionalidades e o seu modo de processamento. Assim, a micromoldação por injecção envolve a plasticização do polímero numa unidade dedicada a essa operação e a sua subsequente injecção num inserto microestruturado. O material é depois arrefecido e a peça extraída. Na Figura 3 apresenta-se uma esquematização do processo. Para uma boa replicação das peças, têm de ser escolhidas condições específicas de processamento. Diferentes estudos [7],[8] demonstraram que os principais parâmetros de processo são:

- Temperatura do molde;
- Velocidade de injecção;
- Pressão de injecção;
- Tempo de manutenção;

- Pressão de manutenção.

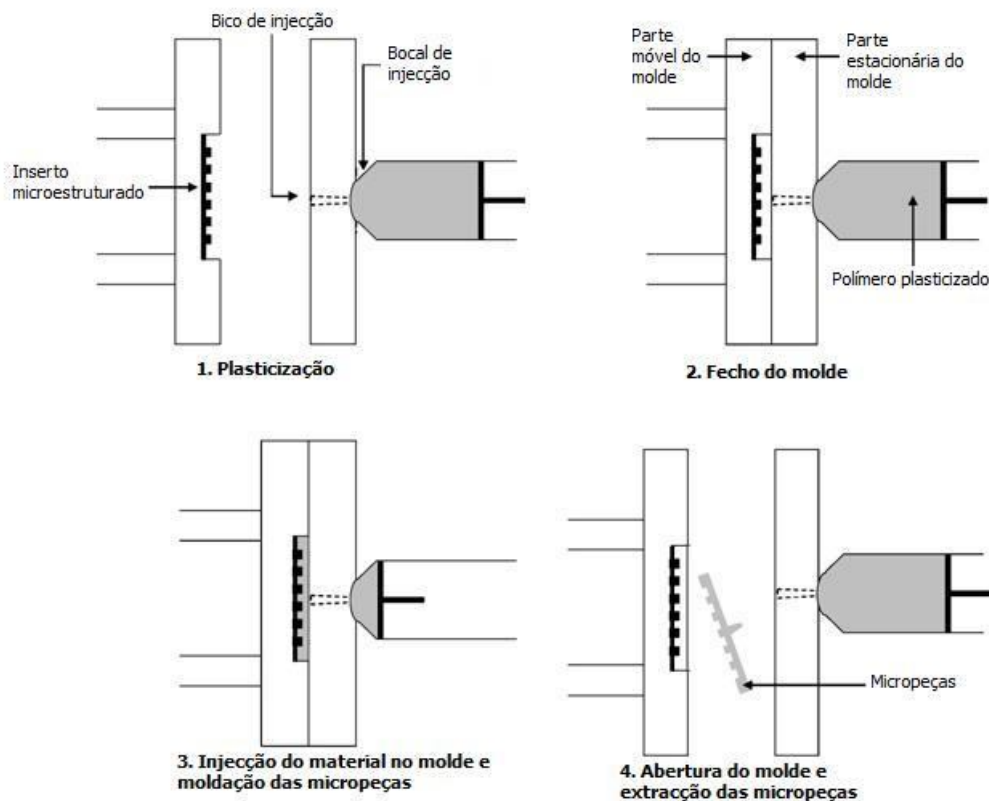


Figura 3: Processo de microinjecção de termoplásticos, adaptado de [9]

O facto de existir um sistema independente para plasticizar o polímero, permite que haja uma limitação no que ao tempo de ciclo diz respeito. O fluxo de material através de pequenos canais e orifícios é feito utilizando altas velocidades e altas pressões, o que pode causar ou pelo menos promover a degradação do mesmo. A fabricação de microcomponentes com elevada razão de aspecto pode ser alcançada usando uma temperatura do molde próxima da temperatura de transição vítrea do material (definida como a temperatura acima da qual um polímero se torna mole e dúctil e abaixo da qual se torna duro e quebradiço), com dimensões estruturais na ordem do nanómetro [5].

Heckele *et al* [6] apresentaram as vantagens e desvantagens entre os dois processos mencionados anteriormente: gravação a quente e micromoldação por injeção. A principal conclusão foi a de que o processo por gravação a quente permite a realização de pequenas a médias séries de peças com alta razão de aspecto. As características dimensionais ou as gamas de tolerância alcançáveis situam-se numa escala que vai da dimensão nano à micro, devido às condições de processamento. Menores níveis de precisão são alcançados pelo

processo de micromoldação por injeção, porque este apresenta um tempo de ciclo mais curto, o que por sua vez consegue fazer sobressair a sua capacidade de produção de grandes séries (mais de 1000 peças).

A tecnologia de micromoldação não consiste apenas num processo simples de redução de escala do processo de moldação clássico, necessitando de sofrer mudanças radicais nos métodos e práticas de trabalho. Por isso, *Martin et al* [10] fizeram uma lista de diferentes questões tecnológicas que são necessárias ter em consideração durante o processo. Tais como:

- Tecnologia de construção do molde;
- Aplicação de engenharia;
- Variação da matéria-prima;
- Precisão da tecnologia;
- Nano-reologia;
- Controlo do processo;
- Propriedades do produto;
- Modelação do processo de moldação.

A fase de injeção é, sem dúvida, a fase mais complexa de todo o processo e é a que apresenta o maior número de diferenças relativamente ao processo convencional. Aqui, os canais de alimentação devem ser reduzidos ao mínimo, o que requer que molde e máquina necessitem de estar preparados para permitir a penetração da unidade de injeção o mais próximo possível da cavidade do molde, caso o sistema seja de canais frios. Durante a injeção do fundido, o ar da cavidade e os gases são expulsos para o exterior. A colocação de canais de escape de gases pode não ser possível a esta escala, pelo que, a introdução de sistemas de vácuo pode representar uma solução.

A extracção da peça é uma operação, regra geral, pouco problemática no processo convencional, contudo, em microinjeção é uma fase algo complexa. Neste processo o recurso a extractores pode, por duas razões, não ser possível. Primeiro, porque as reduzidas dimensões da peça impossibilitam esta situação. Em segundo, porque as elevadas temperaturas do molde levam a que a temperatura de extracção seja muito elevada, o que provocaria marcas profundas dos extractores na peça, contudo esta situação pode ser

minimizada com o recurso a sistemas de aquecimento variável no molde, ou seja, através de um processo variotérmico (ver Figura 4). Posto isto, verifica-se que os sistemas de extracção mais adequados são os sistemas pneumáticos, o recurso a robots e uma técnica mais recente de vibração ultra-sónica [11].

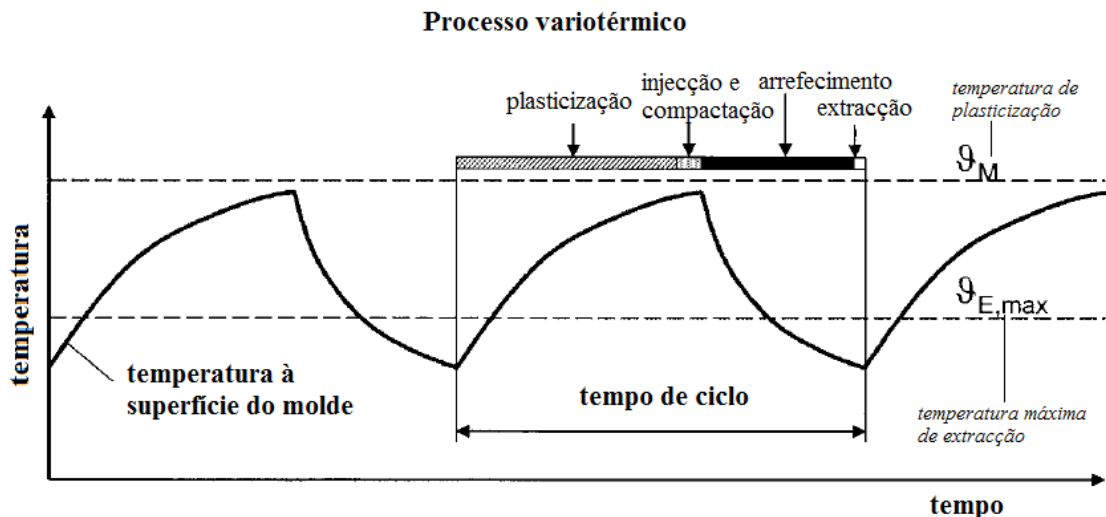


Figura 4: Gráfico de variação de temperatura do molde num processo variotérmico, adaptado de [12].

A micromoldação é por isso uma tecnologia de produção emergente, atraindo bastante atenção, quer da parte científica e académica, quer da parte industrial [5].

2.3.1. Máquinas de microinjecção

O processo de microinjecção foi desenvolvido nos finais dos anos 80 com a modificação de máquinas convencionais, que possuíam forças de fecho que rondavam intervalos de 250 a 500 kN. Nestas, o polímero era plasticizado homogeneamente devido ao calor e ao trabalho mecânico fornecido pelo fuso da máquina. A produção de micropeças com estas máquinas, origina perdas de material substanciais por causa do peso de cada peça representar apenas uma pequena percentagem de toda a massa de polímero utilizada em cada ciclo de injecção. Assim, pode acontecer uma degradação do mesmo durante as fases do processo (plasticização, injecção e moldação, extracção). Além disso, o controlo hidráulico que actua directamente na coluna de injecção não é preciso o suficiente para a produção precisa de peças tão pequenas; as forças de fecho necessárias são

relativamente pequenas devido à pequena dimensão da face do polímero injectado; finalmente, em função do tamanho das peças, as dimensões de toda a máquina deveriam ser menores do que as das máquinas convencionais [5].

Os primeiros passos no desenvolvimento de máquinas de injeção dedicadas à microinjeção foram iniciados em meados da década de 90. O objectivo inicial era reduzir ao mínimo a quantidade de material a injectar, baixar o peso da injeção para apenas 0,025g e, conseqüentemente, reduzir o tempo de residência do material no cilindro da unidade de injeção [3].

Assim, o tamanho dos componentes da unidade de injeção (fuso, câmara de injeção, bico de injeção e bloco quente) e a unidade de fecho do molde, foram diminuídos de forma a limitar a quantidade de material injectado, assim como o consumo de energia. Esta foi a forma inicialmente aplicada no desenvolvimento de máquinas específicas para microinjeção, de maneira a minimizar os desperdícios e a limitar a degradação do polímero [5]. Neste processo, acabaram por sobressair dois conceitos principais de forma a contornar os obstáculos referidos:

- O primeiro consiste em diminuir as dimensões da câmara de injeção e do fuso (com diâmetros inferiores a 20mm) devido à reduzida quantidade de polímero que é necessária para a fabricação das micropeças;
- Para que a fase de injeção seja rigorosa, é necessário que a plasticização/dosagem o seja também. Isto criou muitas dificuldades aos fabricantes de equipamentos, uma vez que os sistemas convencionais de fuso ou de pistão se revelaram pouco eficazes [11]. Sendo assim, o segundo conceito consiste na criação de duas unidades distintas, uma para a plasticização e outra para a injeção. Este conceito contraria o que existe nas máquinas convencionais, uma vez que se passa a utilizar dois sistemas diferentes para o processo de plasticização: um utiliza um fuso e um cilindro aquecido por resistências e o outro utiliza um êmbolo e uma câmara de injeção. O fuso fornece calor baseado em energia térmica e mecânica, o que resulta numa plasticização mais eficiente e homogénea. O material plasticizado é então introduzido na unidade de injeção, onde um êmbolo de reduzido diâmetro força o polímero a deslocar-se para a cavidade. Este êmbolo proporciona um

melhor controlo da quantidade de material injectado para uma mesma disposição, em comparação com um fuso com um maior diâmetro [5].

Nas máquinas de microinjecção o comprimento dos fusos é limitado, apresentando um valor máximo de 12 mm, de acordo com o tamanho normalizado do material em forma granular. O recurso a ultra-sons pode ser um método eficiente para a plasticização de uma pequena quantidade de polímero, como foi recentemente demonstrado em alguns estudos [13]. Já existem várias máquinas de microinjecção no mercado, cujas diferenças principais residem na sua capacidade de injecção, uma vez que podem permitir o fabrico de peças cujo volume varie de 0.082 a 8 cm³. Por vezes as máquinas de injecção convencionais são adaptadas com sistemas de fuso e câmara de injecção para produzirem micropeças [5].

Outro dos desenvolvimentos específicos das máquinas de microinjecção foi o desenvolvimento do modo de transição da pressão de injecção para a pressão de trabalho, que é comumente designado na literatura anglo-saxónica pelo termo “*switchover*” (processo de transferência). Este processo, é geralmente realizado através do curso do êmbolo de injecção e não através da pressão de injecção, como acontece nas máquinas convencionais. Isto permite um melhor controlo da quantidade de material injectado durante a fase de transferência [5].

Para concluir, muitos dos desenvolvimentos aplicados às máquinas de microinjecção foram realizados nos últimos 10 anos no sentido de obter um melhor controlo das diferentes fases do processo: medição, injecção, fase de transferência e manutenção [5] (na figura 5 apresenta-se um modelo de uma máquina deste tipo).



Figura 5: Exemplo de máquina de microinjecção [14]

2.3.2. Materiais aplicados em microinjecção

Os termoplásticos abrangem uma larga variedade de materiais, permitindo encontrar o polímero indicado para uma determinada aplicação específica, desde polímeros estáveis a temperaturas elevadas, a outros que resistem a ataques químicos agressivos, como por exemplo a soluções alcalinas, ácidos e solventes. Existem outros que são isolantes (térmicos e eléctricos), mas quando aditivados com pós apropriados, podem ser usados como condutores eléctricos, dissipadores térmicos ou ímanes. As estruturas micromoldadas podem ser suaves e elásticas tais como o polioximetileno (POM) ou duras e rígidas/quebradiças como a polisulfona (PSU). Estas podem ser feitas de materiais transparentes tais como o copolímero cicloolefina (COC) e outros opacos como a poliamida (PA) preenchida com grafite. Os polímeros como o PVDF exibem até efeitos piezo-eléctricos. Estas características únicas (térmicas, mecânicas e eléctricas) permitem aos termoplásticos serem utilizados em diversas aplicações. A maioria dos componentes de plástico é feita através de processos de injecção (IM- Injection Molding), que se trata de uma técnica de processamento de polímeros já bastante bem implementada [6]. Alguns dos materiais mais utilizados em microinjecção são apresentados na Tabela 1, que constitui uma adaptação da apresentada por [15].

Tabela 1: Alguns materiais utilizados em microinjecção e algumas das suas principais características, adaptado de [15].

Nome	Densidade (g.cm ⁻³)	Temperatura de transição vítrea (T _g) (°C)	Temperatura de plasticização (°C)	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /K)
PMMA	1.19	110	90	3 200	80
PC	1.19-1.24	148	125	2 200 - 2400	70
PP	0.9	0-10	100-110	1450	100-200
PS	0.9-1.24	100	70	2 300 - 4100	30-210
PE (LD/HD)	0.91 (LD); 0.967 (HD)	110/140	80/100	200/1000	170/200
COC	1.02	78	170	2 600	70
COP	1.01	138	140	2 400	70
PEEK	1.3	143	250	3 700	17
PDMS	1.03	-120	200	-	960
PI	1.42	360-410	400	2 500	20
SU-8	1.19	210	380	2 000	52

Legenda: HD- alta densidade (high density); LD- baixa densidade (low density); PMMA- Poli(metacrilato de metilo) ou acrílico; PC- Policarbonato; PP- Polipropileno; PS- Poliestireno; PE- Polietileno; COC- Copolímero Cicloolefina; COP- Copolímero olefina; PEEK- Polieterétercetona; PDMS- Polidimetilsiloxano; PI- Poliimida; SU-8 – Material fotoresistente. Adaptado de [15].

2.3.3. A importância da microinjecção

Espera-se que a utilização de sistemas de micromoldação por injecção na indústria e o número de institutos científicos a investigar nesta área aumente nos próximos anos, o que irá causar um crescente interesse numa visão geral da situação actual da microinjecção.

De acordo com estudos recentes [16], referentes a sistemas microelectro-mecânicos (MEMS) e a microsistemas (MST), foi previsto haver um aumento de valor transaccionado destes, de 12 biliões de dólares em 2005 para 24 biliões em 2009. A principal razão é o desenvolvimento do mercado de sistemas RW (*ReWritable*), cabeças de impressão e *microdisplays*. A maioria dos processos existentes para microsistemas de engenharia, são grandes consumidores de tempo e dinheiro. Espera-se por isso uma melhoria destes processos para as produções futuras [5].

2.3.4. Módulos externos de controlo de injeção

De forma a conseguir utilizar as máquinas de injeção convencionais para produzir peças por microinjeção, surgiram estudos que tiveram por objectivo verificar e projectar a aplicabilidade de um sistema externo de microinjeção que seja adaptável a esse tipo de máquinas. Surge assim um novo conceito de sistemas de moldação por microinjeção.

Este sistema é constituído por um módulo de injeção com canais quentes embutidos e pode ser aplicado em máquinas de 30 a 100 toneladas de parafuso hidráulico alternativo, ou em máquinas totalmente eléctricas. O módulo de microinjeção é fixado entre a placa estacionária da máquina e o molde. Assim, a função deste parafuso hidráulico será alterada, e tornar-se-á num parafuso que serve como unidade extrusora [9].

Devido a este módulo externo se situar entre a placa estacionária da máquina e o molde, foi projectado tal como um molde de forma a ser aplicável nas máquinas de injeção. Assim, a forma do módulo de microinjeção será como uma parte de um molde combinada com um servomotor (quanto maior for a sua potência, maior será a pressão de injeção) e um mecanismo de transmissão. As características principais deste tipo de aplicação são [9]:

- O facto de ser um módulo externo e poder ser aplicado em quase todas as máquinas de injeção convencionais. Assim, os módulos alternativos de injeção nestas máquinas passam a ser usados como fusos de extrusão, tornando-as em máquinas de dois estágios de injeção (através do êmbolo e do fuso). A aptência de um fuso para plasticizar geralmente é melhor que a de um êmbolo.
- Existir um êmbolo adaptado para medir e injectar o material plasticizado de forma precisa. Esta precisão do controlo de volume de plástico a injectar é melhor num êmbolo do que num fuso.
- Um canal quente especial é usado também como um componente de medição e também existe uma válvula reguladora da abertura e fecho do bocal de injeção. Esta fecha o bocal durante o estágio de medição e abre durante a injeção e enchimento do molde.
- Uma válvula é instalada entre os canais de passagem do material e o êmbolo de injeção. A entrada deste canal é ligada ao fuso alternativo, o que permite receber o

fluido que vem do mesmo. A válvula irá abrir e controlar a entrada deste durante a fase de medição da quantidade de material a injectar e irá também prevenir que o material recue e volte a entrar no fuso durante o estágio de injeção, uma vez que fecha nesse estágio.

- Assim que o mecanismo do canal quente cumpre o princípio do “*first-in first-out*”, o polímero plasticizado não permanece mais tempo no seu interior; é por isso que o problema de degradação do material devido ao calor não se verifica na unidade de injeção.
- É utilizado um servomotor e um fuso de esferas para se conseguir um controlo exacto do volume de material a utilizar e uma velocidade de injeção elevada.
- É usada uma régua óptica de alta precisão para fazer a leitura de posição do êmbolo de injeção, de forma a realizar o seu controlo e cuja resolução é de 1 μm ; a velocidade e a aceleração do êmbolo também podem ser avaliadas pela leitura da régua óptica.
- Uma pequena célula de carga é fixada sob o êmbolo para medir a força reactiva que este sofre durante os estágios de injeção e compactação; a pressão do fluido no interior do cilindro de injeção pode por isso ser controlada.
- O ataque do inserto microestruturado pode ser pequeno o que irá reduzir o desperdício de material do sistema de alimentação; a razão de peso entre este e a porção total do material injectado pode ser minimizada.
- Se o volume de material a injectar for muito pequeno, o polímero plasticizado na câmara de injeção pode ser injectado mais do que uma vez na cavidade.

3. Análise das condições iniciais do equipamento receptor

3.1. Apresentação da máquina injectora

No projecto e desenvolvimento de um módulo externo de microinjecção deve ter-se em consideração as características genéricas do equipamento a adaptar. Pretende-se, com este trabalho, desenvolver uma unidade redutora parametrizada e, portanto, facilmente adaptável a todo um conjunto de equipamentos de injecção existente, nomeadamente no que concerne à possibilidade de adaptação de máquinas de injecção ditas convencionais, ou seja, horizontais e de accionamento hidráulico. No entanto, por necessidade do grupo de trabalho que utiliza o equipamento de injecção do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (DEM-UA), e por se tornar mais fácil parametrizar, desenvolvendo um protótipo, tomou-se como equipamento referência a máquina de injecção Euro-Inj D65 existente no Laboratório de Termofluidos no DEM-UA.

Esta é portanto, uma máquina horizontal de accionamento hidráulico cuja força de fecho é de 65 toneladas. Existem para este modelo três “submodelos” diferentes, uma vez que esta apresenta três dimensões de diâmetro de fuso de injecção possíveis de instalar: 28 mm, 32 mm e 36 mm. O modelo que o referido laboratório possui, tem um diâmetro de fuso de 32 mm instalado.

Na Tabela 2 estão indicadas as características principais desta máquina.

Tabela 2: Características da máquina de injeção Euro Inj D-65, adaptado de [17].

Sistema de Injecção	Diâmetro do Fuso [mm]	32
	Relação L/D	20
	Volume Injecção [cm ³]	128
	Peso Injecção [g]	115
	Pressão Injecção [bar]	1777
	Índice Injecção [g/s]	65
	Curso do Fuso [mm]	160
Sistema de Fecho	Força Fecho Máx. [ton]	65
	Máx. Curso Abertura [mm]	270
	Espess. Molde Mín. [mm]	100
	Espess. Molde Máx. [mm]	360
	Abertura Máx. [mm]	630
	Espaço entre Colunas [mm]	320×320
	Diâmetro Colunas [mm]	55
	Máx. Força Extractor [ton]	2.74
	Máx. Curso Extractor [mm]	80
Dados Gerais	Bomba Hidráulica [kW] ([cv])	7.5 (10)
	Pressão Hidráulica [bar]	140
	Potência Aquecimento [kW]	4.4
	Nº Zonas Aquecimento [qtd]	3+N
	Capacidade tanque óleo [l]	220
	Dimensões Máquina [m]	3.8×1.05×1.5
	Peso Máquina [kg]	3 500
	Caudal de óleo debitado pela bomba hidráulica [l/min]	60

Nas secções seguintes apresenta-se uma análise às unidades funcionais do equipamento de injeção existente. A informação obtida será posteriormente, no anteprojecto e projecto do protótipo da unidade redutora, objecto de estudo deste trabalho.

3.2.Determinação da carga de injeção mínima

Em processos de microinjeção os volumes de injeção são baixos, tornando-se pois fundamental verificar a capacidade mínima de material que o equipamento de injeção existente consegue injectar, de forma controlada.

Como a precisão da máquina relativa à definição da posição do fuso de injeção é da ordem do milímetro, supôs-se que a carga mínima possível de definir no painel de comando da mesma seria de 1 mm. No entanto, esta teoria teve de ser confirmada experimentalmente. Para a realização deste teste, o material utilizado foi o PP (polipropileno). A quantidade de material introduzida directamente no fuso da máquina foi equivalente a 115 g. De referir que este abastecimento foi realizado três vezes e que na altura deste teste estava um molde instalado na injectora. Para cada valor de carga definido, foram realizados cinco ensaios. A Tabela 3 apresenta as temperaturas definidas para as diferentes zonas do fuso de injeção.

Tabela 3: Temperaturas definidas na máquina para o processamento do PP. Zona 2: Secção de controlo; Zona 3: Secção de transição; Zona 4: Secção de alimentação de plástico

Bico	Zona 2	Zona 3	Zona 4
220 °C	210 °C	210 °C	200

Definiu-se portanto uma primeira carga equivalente a 2 mm. De referir que o valor real apresentava um desvio de cerca de 0,3 mm do valor estabelecido, devido à existência de plástico residual nas proximidades do bico da injectora. De salientar que, devido ao valor reduzido da carga, o material injectado apenas preencheu o gito do molde que estava montado naquele momento.

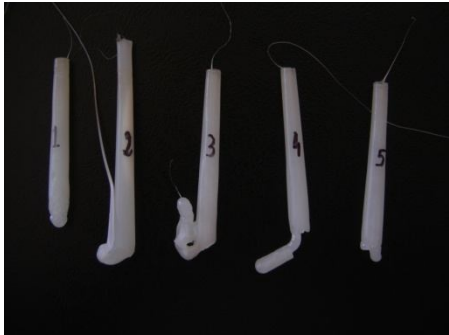
Uma vez confirmado o facto de que seria possível injectar de forma controlada uma carga associada a um curso do fuso de 2 mm, o passo seguinte foi definir uma carga igual à precisão do equipamento referido pelo fabricante, ou seja, foi estabelecida uma carga de 1 mm. Tal como no ponto anterior, apesar de se ter definido o valor de 1 mm, o valor real da carga sofreu o mesmo desvio adicional, devido à justificação já apresentada.

Numa tentativa de explorar as potencialidades da máquina ao máximo, tentou-se estabelecer um novo valor para a carga, desta vez correspondente a um curso do fuso de injeção de 0,5 mm. Tal como se esperava, a máquina aceitou que este valor fosse definido nos parâmetros de injeção, mas ao aceder-se ao painel de comando principal, verificou-se que o valor real apresentado era inconstante. Este último ultrapassava os 100% do valor teórico definido, logo, não existiu sequer a tentativa de realizar a injeção, uma vez que esta não estaria a corresponder a um critério de controlo aceitável. A Tabela 4 representa o painel de comando do equipamento de injeção que se destinava à definição dos parâmetros de injeção. De referir que apenas foi introduzido o valor referente à “Carga 2”, sendo que, os restantes já se encontravam pré-definidos.

Tabela 4: Tabela representativa do painel de comando que permite definir os parâmetros de injeção. Primeira carga e segunda carga.

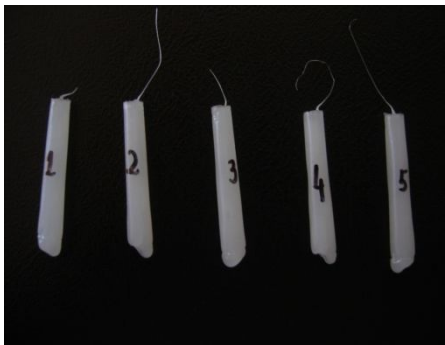
1ª Carga			
	Pressão [bar]	Velocidade %	Posição [mm]
Carga 1	40	50	0
Carga 2	40	50	2
Descompress.	40	10	0
2ª Carga			
Carga 1	40	50	0
Carga 2	40	50	1
Descompress.	40	10	0

Tabela 5: Massas registadas após cada injeção. 1ª Carga

Carga de 2 mm		
	Ensaio	Massa [g]
	1	1,26
	2	2,16
	3	1,88
	4	1,64
	5	1,48
	Média	1,68

Pela análise da Tabela 5, verifica-se que existiram pequenas variações na massa do material obtido em cada ensaio, o que para uma máquina com um fuso de 32 mm de diâmetro se podem considerar aceitáveis. Assim, chegou-se à conclusão de que com uma carga definida para um curso do fuso de injeção de 2 mm, a máquina permite uma injeção controlada, apesar do desvio inicial referido anteriormente.

Tabela 6: Massas registadas após cada injeção. 2ª Carga

Carga de 1 mm		
	Ensaio	Massa [g]
	1	0,87
	2	0,88
	3	0,91
	4	0,81
	5	0,94
	Média	0,88

Observando os últimos resultados obtidos (Tabela 6), verificou-se que apesar da carga definida ser apenas de 1 mm, foi possível injectar plástico nestas condições de forma relativamente controlada, embora existam na mesma as pequenas variações de massa entre ensaios, devido à razão já apresentada.

Após esta análise, concluiu-se que a carga mínima de injeção que é possível definir com esta máquina específica é de 1 mm. Este valor corresponde, de acordo com a Eq. (1) a um volume de material polimérico possível de injectar de $0,804 \text{ cm}^3$.

$$\begin{aligned} V_{\text{injectado}} &= l \times A_{\text{fuso}} \\ &= l \times \frac{\pi \times d^2}{4} \\ &= 0,1 \times \frac{\pi \times 3,2^2}{4} \\ &= 0,804 \text{ cm}^3 \end{aligned} \tag{1}$$

No capítulo seguinte deste trabalho, verificar-se-á que o sistema hidráulico do equipamento existente irá ser determinante para o projecto da unidade redutora.

3.3. Análise dos subsistemas disponíveis

3.3.1. Bomba hidráulica existente e sua capacidade

Em máquinas de injeção de accionamento hidráulico, a bomba hidráulica recebe o óleo a partir do tanque de armazenamento a baixa pressão aumentando-a até um valor requerido pelo sistema, de maneira a conseguir vencer uma força que se opõe ao movimento do fluido. A bomba dota o sistema, de fluxo e pressão hidráulica. Como o fluido é sujeito a um aumento de pressão, ao encontrar no interior da bomba um caminho disponível para fluir rumo às pressões mais baixas, desloca-se nesse sentido, fazendo com que este movimento espontâneo seja aproveitado para a produção de potência mecânica. Esta potência, para o caso de um emissor hidráulico (bomba) deve ser entendida como a

diferença de pressão induzida pelo deslocamento mecânico de um dos seus componentes. As bombas hidráulicas mais comuns são do tipo volume fixo e volume variável [1]. Não existe porém nenhum tipo de bomba que seja considerada perfeita para todas as classes e tamanhos de máquinas de injeção. A energia primária é normalmente convertida por um motor eléctrico ou um motor de combustão interna, sendo que na indústria o mais usado é o motor eléctrico. Este converte energia eléctrica em energia mecânica (binário e rotação) sendo o seu eixo directamente acoplado ao eixo da bomba que converte a energia mecânica, criando um caudal. A bomba hidráulica da Euro-Inj D65 tem uma potência de 7,5 kW sendo capaz de gerar uma pressão hidráulica de 140 bar e debitar um caudal de óleo de 60 l/min.

3.3.2. Acoplamentos possíveis

A montagem de um molde na máquina tem de garantir uma firme fixação do mesmo aos pratos da máquina, de forma a não haver escorregamento do molde, ou mesmo a sua queda e, por outro, o alinhamento do eixo do gito com o bico da unidade de injeção da máquina. Torna-se assim importante saber qual o tipo de montagem do molde, isto é, se o molde deve ser montado com a centragem feita por um anel e aperto manual, ou se a máquina tem algum dispositivo especial de montagem que obrigue a soluções especiais ou normalizadas. O tipo de montagem mais comum é a montagem vertical, onde existe um melhor aproveitamento da área dos pratos da máquina podendo haver, no entanto, o risco de interferência com robots. Para facilitar a fixação do molde à máquina a melhor solução é utilizar placas de aperto, que sejam salientes em relação às outras placas da estrutura [18]. O equipamento disponível permite assim que este tipo de fixação seja possível.

4. Anteprojecto do sistema em desenvolvimento

Unidade redutora é a designação aqui apresentada para o sistema de controlo de injeção que se pretende desenvolver no âmbito deste estudo. Tal como referido anteriormente, o processo de microinjeção abre todo um conjunto de oportunidades de negócio, podendo mesmo vir a contribuir para um aumento da competitividade das empresas, uma vez que se criam novas oportunidades e/ou nichos de mercado. Assim, com este trabalho, pretende-se desenvolver um equipamento capaz de realizar operações de microinjeção de forma controlada, que servirá para que empresas que operem e que utilizem processos de injeção convencional possam, sem realizarem um investimento elevado, enfrentar a cada vez maior tendência de miniaturização de componentes de forma competitiva.

4.1. Apresentação do sistema proposto

A unidade redutora em desenvolvimento baseia-se em soluções encontradas na literatura [9]. No entanto, o tipo de solução preconizada neste trabalho visa o aproveitamento do accionamento hidráulico do equipamento de injeção, sendo pois fundamental, estudar e desenvolver soluções para esse fim. Esta decisão tem a si associadas outras de natureza estrutural e construtiva, mas também de simplificação de projecto. De referir que apesar de se terem considerado as especificações do equipamento de injeção disponível, esta unidade redutora pode facilmente ser adaptada a outros equipamentos de actuação hidráulica horizontais, de gamas e dimensões diferentes, desde que, determinados requisitos específicos sejam respeitados. Nomeadamente:

- pressão hidráulica: este factor é importante, na medida em que foi uma das variáveis que determinou o dimensionamento e a escolha do sistema de accionamento. Assim, um dos requisitos que a máquina de injeção deverá apresentar, é uma pressão hidráulica ≥ 140 bar;
- diâmetro do fuso: este factor será também determinante para o funcionamento da unidade redutora, uma vez que, permitiu definir o volume mínimo de material que o equipamento disponível permite injectar. Sendo assim, o diâmetro do fuso máximo que os equipamentos de injeção podem apresentar

para que o funcionamento deste sistema seja possível, tem de estar limitado a 60 mm (considerando que é possível definir a carga mínima de injeção de 1 mm), evitando que o volume de material plástico que a unidade redutora permite injectar não seja ultrapassado. Uma máquina com um diâmetro de fuso igual a 60 mm, permite estabelecer um volume de injeção mínimo igual a $2,827 \text{ cm}^3$. A Figura 6 representa o antes e o depois do *upgrade* que as máquinas de injeção convencionais sofrem quando lhes é instalada a unidade redutora. A Figura 7 exemplifica o modo de funcionamento do processo de injeção no interior da unidade redutora.

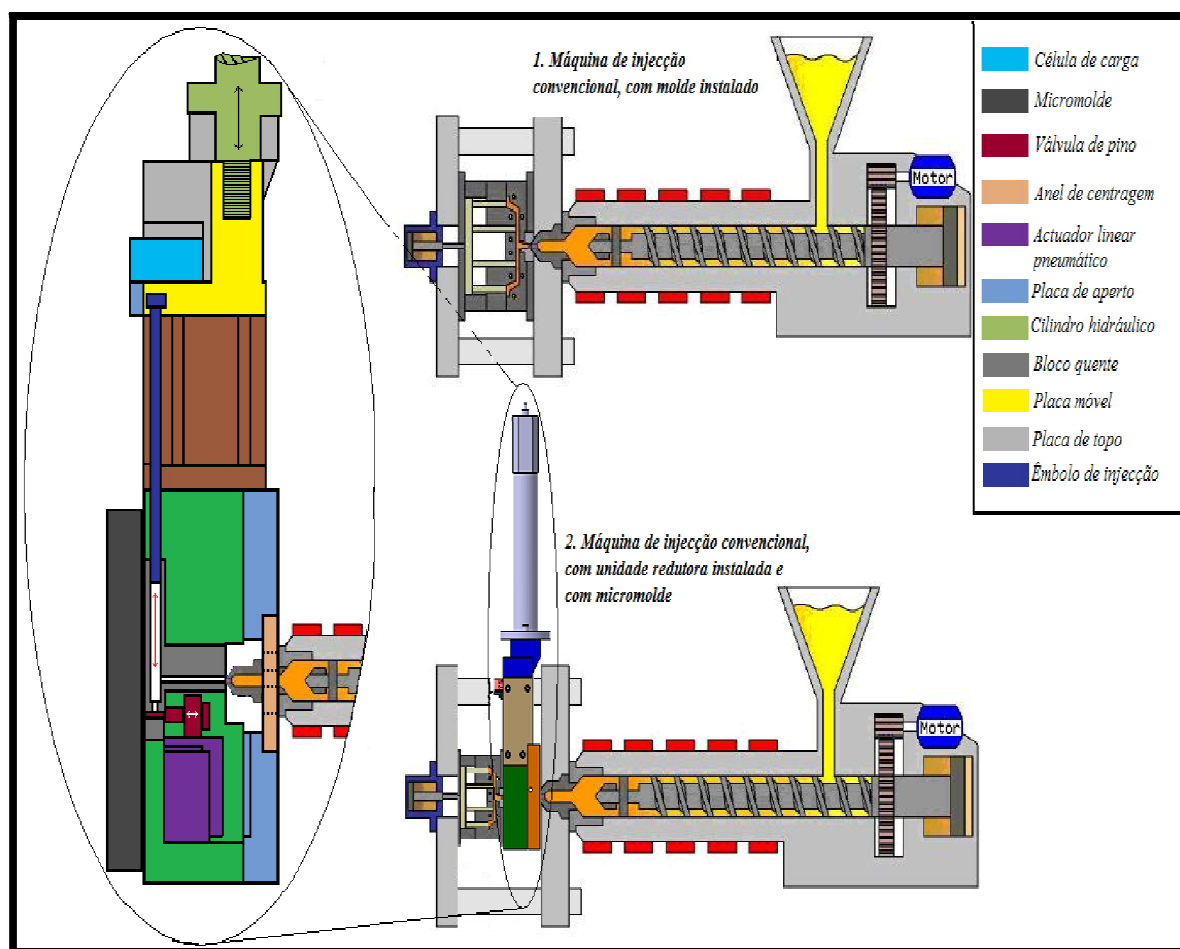


Figura 6: Imagem ilustrativa de uma máquina de injeção convencional, antes e depois, de lhe ser instalada a unidade redutora

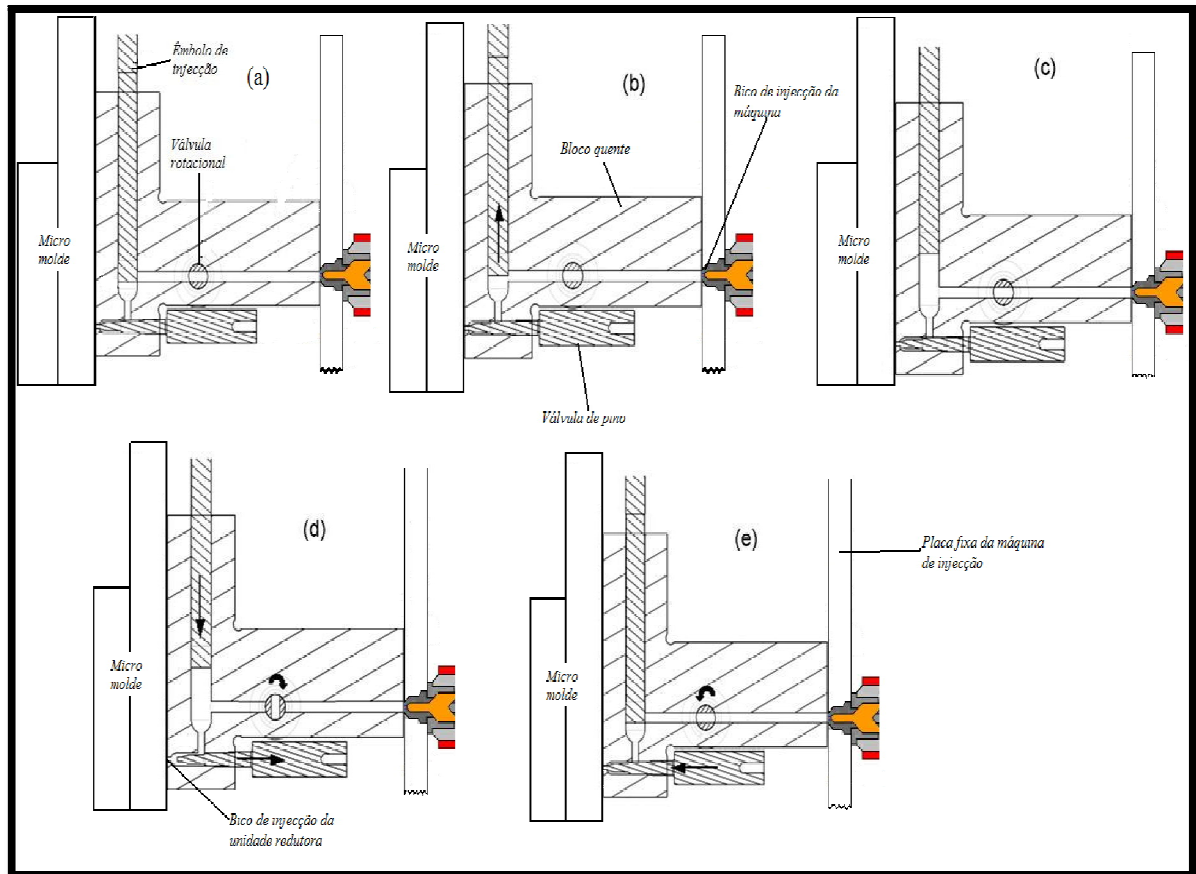


Figura 7: Esquema do processo de injeção e de funcionamento das válvulas, de pino e rotacional, na unidade redutora. (a) Stand by; (b) Injeção de material por parte do fuso da máquina. O êmbolo move-se para cima e controla a quantidade de material necessário para a injeção; (c) O volume de material a injectar fica definido; (d) A válvula de pino abre, a válvula rotacional fecha e o polímero é injectado para o molde; (e) As duas válvulas realizam o processo inverso, e termina o ciclo. Adaptado de [9].

Este sistema permitirá o controlo total de variáveis/parâmetros de injeção, como por exemplo, velocidade, volume, pressão e controlo de temperatura. Por sua vez, o sinal resultante dos equipamentos instalados para controlar essas mesmas variáveis, é captado por um autómato programável. De referir que o controlo do volume de injeção é feito por um transdutor de posição associado ao sistema de accionamento do êmbolo (cilindro hidráulico), uma vez que, controlando a posição absoluta do mesmo consegue-se controlar o volume de plástico a injectar. A velocidade de injeção é definida pelo caudal de óleo que o equipamento injector permite debitar e pela dimensão do cilindro hidráulico, podendo ser controlada pelo referido transdutor. O controlo da pressão de injeção é realizado por uma célula de carga, que mede a força reactiva sofrida pelo êmbolo, permitindo, consequentemente conhecer as pressões envolvidas no processo. O controlo de temperaturas é feito por termopares que se encontram integrados nas resistências de

cartucho, cuja função é elevar o bloco quente (componente da unidade redutora por onde flui o material polimérico) à temperatura de plasticização requerida pelo polímero que será injectado. Finalmente, o controlo das válvulas existentes (de rotação e de pino) que permitem o fluxo de plástico no interior da unidade redutora é realizado por dois actuadores pneumáticos (de referir que estes serão accionados individualmente por uma electroválvula monoestável 5/2 com tensão de trabalho igual a 24V DC).

Sendo assim, este sistema redutor proporciona os seguintes parâmetros de injeção:

- pressão de injeção: 2200 bar;
- volume máximo de injeção: 2,934 cm³;
- gama de temperaturas de plasticização: 70 °C - 410 °C;
- velocidade de injeção: 909,1 mm/s.

Todo o processo de cálculo e todos os pressupostos que permitiram obter os valores anteriores, bem como todas as opções construtivas tomadas encontram-se descritos e justificados de forma detalhada nas secções seguintes deste capítulo.

4.2. Pré-dimensionamento de variáveis de projecto

Antes de se realizar o desenvolvimento e projecto desta unidade, foi necessário realizar uma pré-definição de pelo menos dois parâmetros do sistema, nomeadamente: o diâmetro do êmbolo de injeção e a pressão de injeção. As dimensões gerais dos componentes que não se encontram discutidas nesta secção, foram arbitradas dentro de valores considerados razoáveis, tendo sempre presente o objectivo da sua minimização de modo a projectar um sistema compacto e o mais económico possível.

4.2.1. Volume de injeção

O dimensionamento do diâmetro do êmbolo de injeção foi realizado tendo em conta que o módulo de microinjeção deverá servir uma ferramenta moldante com uma

capacidade específica no que diz respeito ao volume de injeção máximo admissível que aqui se considera como sendo $1,62 \text{ cm}^3$. Sendo um dos factores determinantes no que à capacidade de injeção diz respeito, definiu-se com base numa ordem de valores de diâmetros de êmbolos aplicados em máquinas de microinjeção [5], que este teria um diâmetro de 8 mm. Este valor permite obter assim uma câmara de injeção compacta para o volume definido. Por exemplo, se o diâmetro fosse menor, a referida câmara teria uma altura exagerada, acabando por ter de se sobredimensionar todo o sistema, o que traria desvantagens a nível dos custos de produção.

Em processos de injeção de termoplásticos a massa da peça é muito superior à massa do sistema de alimentação. Em microinjeção, este pressuposto é o oposto, uma vez que, o sistema de alimentação representa na maioria dos casos cerca de 80% do peso total de injeção [11]. Maximizando então o volume de material a injectar em igual percentagem à indicada de forma a contemplar o material destinado, tal como referido, para o sistema de alimentação, chegou-se a um volume de material plástico máximo possível de ser injectado pelo módulo externo de microinjeção de: $2,934 \text{ cm}^3$.

4.2.2. Pressão de injeção

Designa-se por pressão de injeção a pressão máxima que se desenvolve durante a fase de enchimento. Esta pressão é o resultado do esforço necessário para garantir o enchimento de um determinado material, numa impressão com uma geometria específica, e à velocidade ajustada pelo operador [18]. Este parâmetro depende normalmente de factores como: tipo de matéria-prima, complexidade das peças a injectar, qualidade do molde, volume de injeção, etc [19]. Como nesta fase nenhuma destas características era conhecida em concreto, tornou-se necessário estabelecer e definir um valor máximo para a pressão de injeção.

Tal como foi mencionado, o sistema hidráulico que a máquina injectora possui, tornou-se determinante, sendo a definição da pressão de injeção uma consequência do mesmo. De facto, em vez de se utilizar um servomotor para fazer a actuação do êmbolo de injeção, tal como *P.-C. Chang et al* [9] propuseram, decidiu-se aproveitar as funcionalidades que a própria máquina dispõe, o que levou a que a escolha do componente

de accionamento e controlo de movimento do referido êmbolo fosse um cilindro hidráulico. Sendo assim, e para o dimensionamento do mesmo, foi necessário definir-se a pressão de trabalho máxima a que este teria de operar, ou seja, a pressão máxima de injeção. Tendo por base o trabalho realizado por *Giboz et al [5]*, onde foi apresentada uma tabela com diferentes máquinas específicas para microinjeção e suas características, e considerando o valor máximo do volume de injeção, foi definido que a pressão de injeção seria de 2200 bar. Sendo assim, seria este o limite máximo de pressão que a aplicação conseguiria exercer. Este torna-se fundamental para estabelecer a força que permitirá dimensionar o cilindro hidráulico.

4.2.3. Temperatura de plasticização

Há um quarto de século, controlar a temperatura em máquinas de injeção era um processo limitado à escolha entre uma selecção manual da potência das resistências ou um simples ligar - desligar de interruptores [1]. Tal como referido anteriormente, um dos principais parâmetros de injeção é a temperatura. Segundo vários estudos [20], [21] as temperaturas envolvidas no processo de injeção são, de todos os parâmetros, os mais importantes. Relativamente à temperatura de plasticização, esta deve ser o mais próximo possível da temperatura máxima recomendada pelo fornecedor do termoplástico. A temperatura do molde deve ser superior à temperatura de transição vítrea para materiais amorfos e superior à temperatura de fusão para materiais cristalinos. A necessidade de elevados valores de temperaturas prende-se com a importância da viscosidade do fundido [11]. Sendo assim, recorrendo à tabela onde se apresenta uma lista de materiais termoplásticos utilizados em aplicações de microinjeção (Tabela 1), a unidade redutora deverá permitir fornecer temperaturas de plasticização desde os 70 °C a 400°C.

4.2.4. Velocidade de injeção

Designa-se por velocidade de injeção, a velocidade de avanço do fuso durante a fase de enchimento da impressão (expressa em mm/s). Corresponde pois ao débito (ou caudal) com que o material é injectado (expresso em l/min). O controlo da velocidade de injeção, só é possível, se o equipamento tiver capacidade de desenvolver a pressão

necessária para fazer fluir o material à velocidade pretendida. Acresce que, devido ao comportamento dos polímeros quando se encontram plasticizados, no conjunto molde/máquina/material a evolução da pressão em função da velocidade de injeção tem a forma característica que a Figura 8 demonstra. A velocidade de injeção a seleccionar corresponde ao ponto de pressão mais baixo. Esta condição minimiza o nível de tensões internas na peça, o consumo energético e o desgaste do equipamento [18]. Tendo em conta que em processos de microinjecção os tempos de ciclo podem ser muito curtos, é necessário que os equipamentos injectores tenham a capacidade de proporcionar velocidades de injeção elevadas.

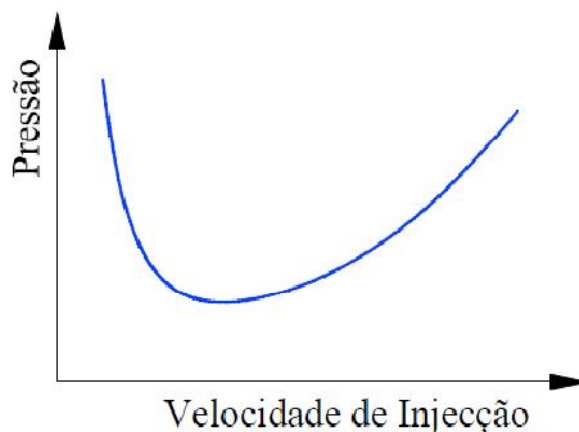


Figura 8: Evolução da pressão em função da velocidade de injeção [22]

Sendo assim, e tendo em conta as características, tanto da máquina de injeção disponível como do cilindro hidráulico seleccionado como accionamento da unidade redutora, surgiu a necessidade de calcular a velocidade de injeção que esta poderia proporcionar.

Quando uma determinada superfície se desloca uma distância infinitesimal dx e este deslocamento é acompanhado pelo movimento de um fluido desde a sua posição original, fluido esse que deverá preencher um volume $A dx$, em que A é a área da secção transversal da conduta na localização considerada, consegue-se chegar de imediato à expressão que permite obter o caudal volúmico (Eq. 2).

$$Q = \frac{A dx}{dt} \quad (2)$$

Aplicando a equação anterior ao caso real da unidade redutora, torna-se necessário saber qual o intervalo de tempo infinitesimal dt , que o êmbolo do cilindro demora a percorrer a distância pretendida dx , sabendo que:

- $Q_{\text{bomba_hidráulica}} = 60 \text{ l/min} = 1 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{s}$;
- $A_{\text{cilindro_hidráulico}} = 1100 \text{ mm}^2$;
- $dx = 60 \text{ mm}$ (tanto este valor, como o anterior, se encontram calculados na secção seguinte).

Pela substituição destes valores na Eq. (2), determinou-se o intervalo de tempo que o êmbolo do cilindro hidráulico demora a percorrer a totalidade do seu curso, obtendo-se o seguinte resultado: $dt = 0,066 \text{ s}$.

$$dt = \frac{Adx}{Q} \Leftrightarrow dt = \frac{1100 \times 60}{1 \times 10^6} \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow dt = 0,066 \text{ s}$$

Conhecendo-se este resultado, para se atingir a velocidade de injeção que a unidade redutora pode fornecer, calculou-se a distância que o cilindro percorreria num intervalo de tempo igual a 1 s, chegando-se a um resultado que permite estabelecer que a velocidade de injeção é igual a 909,1 mm/s.

4.3. Dimensionamento das variáveis do cilindro hidráulico

A escolha de um cilindro hidráulico para realizar a actuação deste sistema de injeção, deveu-se ao facto deste se destinar a equipamentos injectores horizontais e de actuação hidráulica, permitindo (tal como referido anteriormente) o aproveitamento deste tipo de accionamento. Esta escolha apresenta desde logo vantagens em relação a um sistema de actuação eléctrico uma vez que se torna mais robusto, de mais fácil e mais barata manutenção, permitindo obter igualmente velocidades elevadas. Esta escolha evita, por exemplo, a necessidade de existir um fuso de esferas para transmitir movimento linear ao êmbolo de injeção, assim como uma régua óptica. Para tal, pretende-se escolher um

cilindro hidráulico que já possua sistema de controlo integrado, como por exemplo, um transdutor absoluto de posição.

Sendo conhecidos os valores da pressão de injeção e da área do êmbolo de injeção, encontraram-se então as condições necessárias para se iniciar o dimensionamento das principais variáveis do cilindro hidráulico.

De acordo com a Eq. (3) e maximizando o valor obtido para um valor normalizado, obteve-se uma força máxima para o cilindro de 11 kN.

$$\begin{aligned} F_{cilindro} &= P_{injecção} \times A_{êmbolo} \\ &= 2200 \times 10^5 \times 50,565 \times 10^{-6} \\ &= 11058,3N \cong 11 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4)$$

Para o cálculo do curso do cilindro, foi necessário determinar primeiramente a altura da câmara de injeção, uma vez que o volume máximo possível de injectar está dependente desta dimensão. Assim, esta altura tornou-se no factor determinante para definir o curso necessário que o cilindro hidráulico necessita. Então, segundo a Eq. (5), maximizando novamente o valor obtido de forma a contemplar quaisquer perdas de material que possam existir, o valor do curso do cilindro será de 60 mm.

$$\begin{aligned} h_{câmara de injeção} &= \frac{V_{máx de injeção}}{A_{êmbolo}} \\ &= \frac{2934 [mm^3]}{50,265 [mm^2]} = 58,371 \text{ mm} \\ &\Rightarrow \text{Curso do cilindro} = 60 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5)$$

Para se obter o diâmetro interior do cilindro, foi necessário recorrer ao manual da máquina, pois através da pressão hidráulica que a máquina consegue exercer, chegou-se ao valor da área da secção transversal do mesmo, e consequentemente, ao valor de diâmetro desejado. Conforme a Tabela 2, que apresenta as características da Euro Inj D-65, a

pressão que o seu sistema hidráulico consegue fornecer é de 140 bar. Tendo em conta este valor, e sabendo que o sistema hidráulico não seria solicitado apenas pelo cilindro que se está a dimensionar, estabeleceu-se de forma maximizada, que a pressão que iria ser disponibilizada para o cilindro seria de 100 bar. Logo, reescrevendo a Eq. (4), obteve-se o valor da área da sua secção transversal, cujo valor é de $11 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Uma vez obtido o valor da área da secção do cilindro, conseguiu-se obter mais uma das variáveis necessárias para a caracterização do mesmo, ou seja, o seu diâmetro interior, e que aplicando e desenvolvendo a Eq. (6) em ordem a D (mas desta vez em relação à área da secção do cilindro), chegou-se a um valor normalizado de 40 mm.

$$\begin{aligned} A_{cilindro} &= \frac{F_{cilindro}}{P_{hidráulica}} \\ &= \frac{11 \times 10^3 [N]}{100 \times 10^5 [Pa]} \\ &= 11 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{cilindro} &= \frac{\pi \times D^2}{4} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4 \times (11 \times 10^2 [mm^2])}{\pi}} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow D = 37,424 \text{ mm} \\ &\Rightarrow D_{cilindro \text{ normalizado}} = 40 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

Estando já definidas as variáveis do cilindro, foram contactadas várias empresas que fabricam e comercializam este tipo de componentes. Assim, seleccionou-se um equipamento com sistema de controlo e medida de posição já integrado, evitando a instalação de uma régua óptica ou qualquer outro componente de medida, bem como as peças necessárias à sua fixação. O sistema de fixação escolhido foi de flange dianteira.

4.4. Projecto e desenvolvimento da unidade redutora

Nesta secção, encontram-se totalmente justificadas todas as opções tomadas a nível construtivo e funcional da unidade redutora, que permitem que a mesma satisfaça todos os requisitos de funcionamento e processamento de material plástico. De referir que toda a modelação foi realizada no software CAD/CAM CATIA V5.

4.4.1. Elementos funcionais

Bloco quente

Esta designação advém do facto de neste componente existir a necessidade de serem incorporados cartuchos de aquecimento (*hotrod's*), para que, quando o plástico entre em contacto com o mesmo, não solidifique instantaneamente uma vez que o volume de material a injectar é relativamente reduzido. Este componente é um dos que revela maior importância neste trabalho, já que é o único que irá estar em contacto directo com o material plasticizado. Sendo assim, é no bloco quente que se encontra integrada a câmara de injeção/transferência. Em termos dos principais aspectos construtivos, de referir que o espaço destinado ao acoplamento dos cartuchos de aquecimento, tem um diâmetro de 8 mm, o que limita o diâmetro dos mesmos a este valor. O canal por onde o plástico entrará no módulo de microinjeção, ou seja, onde o bico da máquina encostará, apresenta um diâmetro de 2,5 mm. Este canal quente apresenta um furo no qual irá trabalhar a válvula rotacional, cujo accionamento é realizado por um actuador rotativo pneumático, tal como se descreve num dos pontos seguintes. O bico de injeção apresenta um diâmetro de 1 mm. A Figura 9 representa o bloco quente projectado. O material a ser aplicado neste componente é o aço Orvar 2M (ver Tabela 9, Secção 4.4.4. *Material aplicado*). De referir que a forma dada a este componente é a que se apresenta na Figura 9, e não um bloco cúbico, pois se assim fosse existiria uma maior necessidade de esforço energético para elevar uma quantidade de material muito superior à temperatura de plasticização do material polimérico em processamento. Assim, existe uma poupança quer a nível de custo de material, quer a nível do número de resistências ou potência das mesmas, o que, consequentemente, implica um benefício em termos energéticos para todo o sistema.

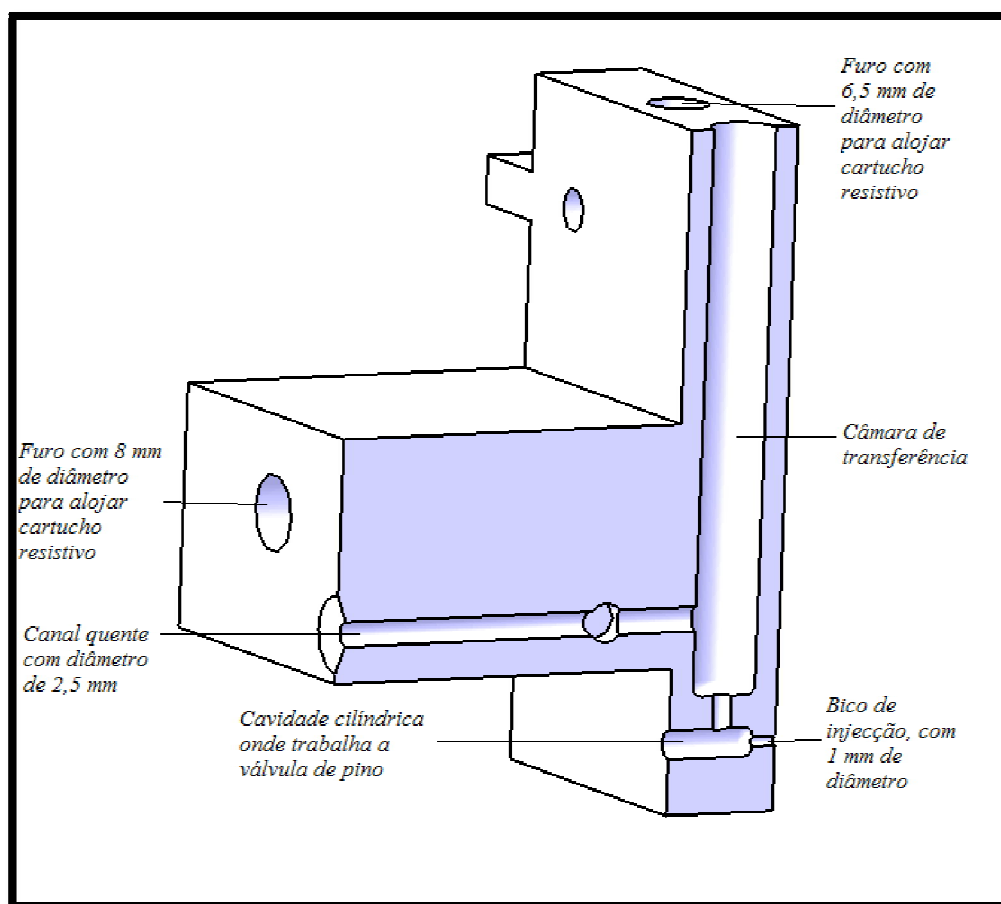


Figura 9: Corte esquemático do bloco quente

Resistências de cartucho

Tendo em conta a necessidade de satisfazer os requisitos térmicos do bloco quente (gama de temperaturas de plasticização de 70 °C - 400 °C), existiu a necessidade de aplicação de resistências de cartucho ao mesmo, dotando-o assim de um sistema de canais quentes. As variáveis em análise são: a potência do cartucho para que fosse atingida a temperatura máxima de plasticização (tendo por base os materiais apresentados na Tabela 1); o tempo que o cartucho demoraria a atingir essa temperatura.

Para o cálculo térmico e dimensionamento das resistências considerou-se que se estaria perante um processo de transferência de calor unidimensional sem geração de calor, aplicado a sistemas radiais. Para sistemas nestas condições, a forma apropriada da equação é:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (6)$$

onde, k é a condutividade térmica do material. O significado físico desse resultado torna-se evidente se também se considerar a forma apropriada da lei de Fourier. A taxa à qual o calor é conduzido através de uma superfície cilíndrica qualquer pode ser expressa como sendo:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

em que $A=2\pi rL$ é a área normal à direcção da transferência de calor. Uma vez que a Eq. (6) diz que a grandeza $kr(dT/dr)$ é independente de r , segue da Eq. (7) que a taxa de transferência de calor por condução q_r é uma constante na direcção radial. Resolvendo a Eq. (7), foi possível determinar a distribuição de temperatura, aplicando as condições limites apropriadas. Considerando o valor de k como constante, a Eq. (7) pode ser integrada duas vezes para se obter a solução geral [22]:

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (8)$$

Para se obter as constantes de integração C_1 e C_2 , foram consideradas as seguintes condições de fronteira:

$$\bullet \quad C_1: \quad -k \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_1} = \frac{q}{2\pi r_1 L} \quad (9)$$

$$\bullet \quad C_2: \quad T(r) \big|_{r=r_1} = T_{m\acute{a}x} \quad (10)$$

Desenvolvendo as condições anteriores vem que:

$$\bullet \quad C_1: \quad -k \frac{C_1}{r_1} = \frac{q}{2\pi r_1 L} \Leftrightarrow C_1 = -\frac{q}{2\pi r_1 L} \quad (9.1)$$

$$\bullet C_2: T_{m\acute{a}x} = C_1 \ln(r_1) + C_2 \Leftrightarrow C_2 = T_{m\acute{a}x} - C_1 \ln(r_1) \Leftrightarrow C_2 = T_{m\acute{a}x} + \frac{q}{2\pi r_1 L} \quad (10.1)$$

Substituindo as constantes na solução geral, vem que:

$$T(r) = \frac{q}{2\pi Lk} [\ln(r_1) - \ln(r)] + T_{m\acute{a}x} \quad (8.1)$$

Uma vez obtida a equação anterior, foi necessário confirmar se a mesma satisfazia as condições necessárias. Após serem contactados alguns fornecedores de resistências deste tipo, foi definido, de acordo com os valores de catálogo e com as limitações dimensionais que o bloco quente impunha, que os cartuchos que iriam ser alojados na cavidade com 8 mm de diâmetro teriam um comprimento normalizado de 40 mm e os que viessem a ser instalados na cavidade com 6,5 mm de diâmetro teriam um comprimento, também ele normalizado, de 50 mm. Segundo o fornecedor que melhor orçamento apresentou, ambos os cartuchos conseguiam debitar uma potência de 250 W, e a sua temperatura máxima de funcionamento seria de 600 °C. Surgiu assim a necessidade de verificar a seguinte condição:

$$400 \leq \frac{q}{2\pi Lk} [\ln(r_1) - \ln(r)] + T_{m\acute{a}x} \quad (11)$$

Tendo os seguintes dados e substituindo na inequação anterior, para $r=r_2$ vem que:

- $L=40$ mm;
- $T_{m\acute{a}x}=600$ °C;
- $r_1 = 4$ mm e $r_2= 18,028$ mm (ver Figura 10);
- $q= 250$ W;
- $k_{aço}=29$ W/(m °C).

$$400 \leq \frac{250}{2\pi \times 0,04 \times 29} [\ln(0,004) - \ln(0,018028)] + 600 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 400 \leq 548, \text{ logo, a condição foi satisfeita}$$

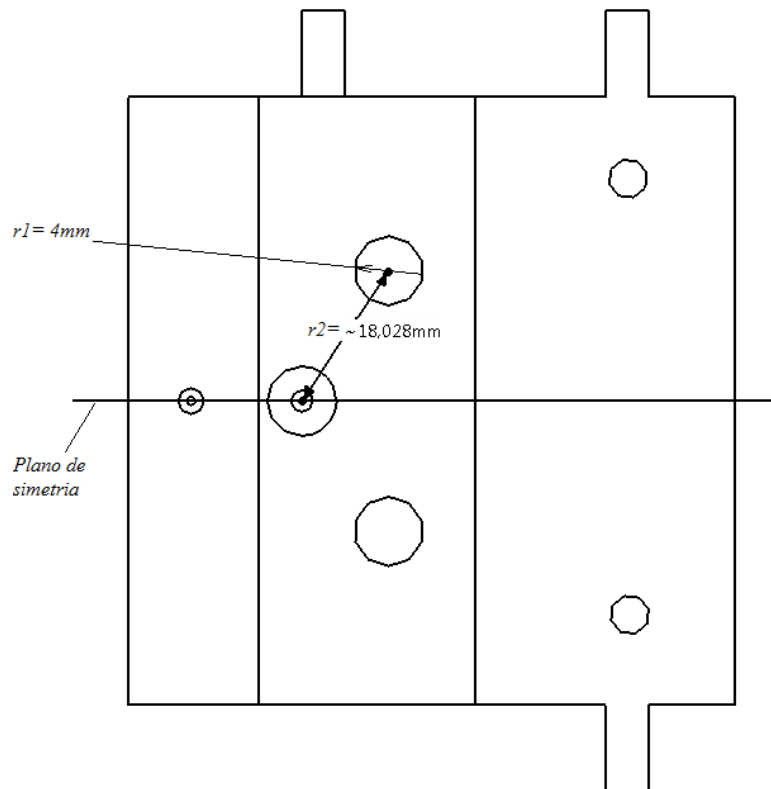


Figura 10: Identificação de r_1 e r_2

Realizando o mesmo cálculo, mas agora para o cartucho de diâmetro 6,5 mm, onde r_1 é substituído por r_3 e $r=r_4$, vem que:

- $L=60$ mm;
- $T_{\text{máx}}=600$ °C;
- $r_3= 3,25$ mm e $r_4=15$ mm (ver Figura 11);
- $q= 250$ W;
- $K_{\text{aço}}=29$ W/(m °C);

$$400 \leq \frac{250}{2\pi \times 0,06 \times 29} [\ln(0,00325) - \ln(0,015)] + 600 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow 410 \leq 565, \text{ logo, a condição foi satisfeita}$$

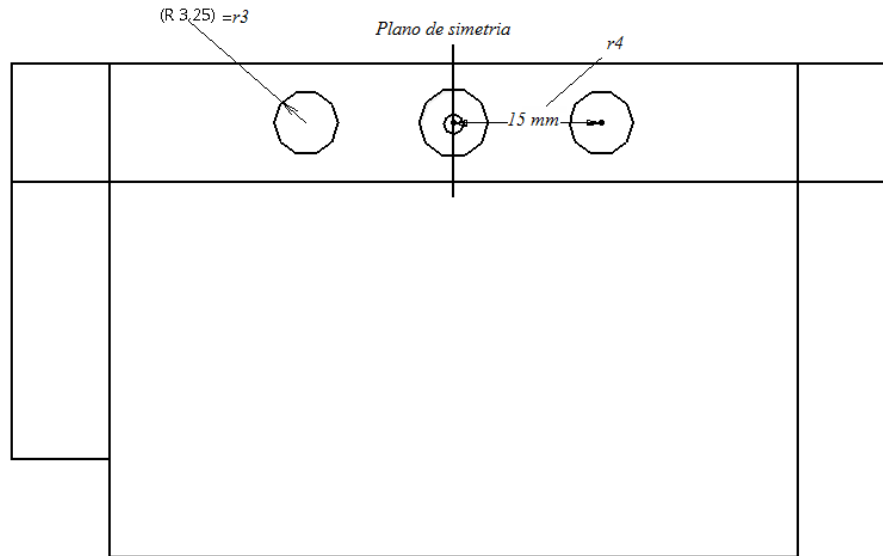


Figura 11: Identificação de r_3 e r_4

Uma vez confirmada a condição expressa pela Eq. (11) para ambos os cartuchos, tornou-se necessário calcular o tempo que se demoraria a atingir a temperatura de 400°C , para $r=r_2$ e $r=r_4$. Para isto, considerou-se que o bloco quente se tratava de um sólido semi-infinito com condução unidimensional, mas agora em regime transiente. Um sólido semi-infinito proporciona uma idealização útil para diversos problemas práticos, como o caso do bloco quente. Para o caso de uma superfície a temperatura constante, *Incropera et al* [22] apresentam a seguinte solução

$$\frac{T(x, t) - T_s}{T_i - T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (12)$$

onde, T_i é a temperatura inicial a que se encontra o sólido, que foi considerada igual à temperatura ambiente, de 20°C ; T_s é a temperatura à superfície do cartucho, o que maximizando este valor fica igual à $T_{\text{máx}}=600^\circ\text{C}$; x é a coordenada onde se pretende obter o resultado final; $\alpha=k_{\text{aço}}/(\rho_{\text{aço}}c_p)$; t é a variável tempo; $\text{erf}(w)$ é a função de erro Gaussiana, e trata-se de uma função matemática normalizada que se encontra tabelada no Apêndice B de [22]. Assim sendo, e para $x=r_2$ e $T(x,t)=400^\circ\text{C}$, da Eq. (11) resulta que:

$$\frac{400-600}{20-600} = \text{erf}\left(\frac{18,028 \times 10^{-3}}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \Leftrightarrow 0,34482 = \text{erf}\left(\frac{18,028 \times 10^{-3}}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (12.1)$$

Para determinar o valor de α consideram-se as propriedades do aço, retiradas do catálogo do fornecedor (ver tabelas 8 e 9), que dará forma ao bloco quente, chegando-se ao seguinte valor:

$$\alpha = \frac{k_{aço}}{\rho_{aço} \times c_{p_{aço}}} = \frac{29}{7800 \times 460} = 8,08 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (13)$$

Obtido este valor e o valor de $erf(w)$, foi necessário recorrer ao referido Apêndice B de [22], o que para o resultado $erf(w) = 0,34482$, implicou que o w fosse igual a 0,31579. Reuniram-se então todas as condições para determinar o tempo que o canal de injeção demoraria a atingir a temperatura desejada. Resolvendo a Eq. (14) em ordem a t , vem que:

$$\begin{aligned} \text{Sendo } w &= \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} & (14) \\ \Rightarrow 0,31579 &= \frac{18,028 \times 10^{-3}}{2 \times \sqrt{8,08 \times 10^{-6} \times t}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow t &= \frac{(18,028 \times 10^{-3})^2}{(2 \times 0,31579)^2 \times 8,08 \times 10^{-6}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow t &\approx 100,8 \text{ s} \end{aligned}$$

Aplicando o mesmo raciocínio mas agora para $x=r_4$, o valor de w mantém-se inalterado, uma vez que a função de erro toma também ela própria o mesmo resultado. Obteve-se então um valor de $t = 69,8 \text{ s}$, tal como se ilustra de seguida.

$$\begin{aligned} \Rightarrow 0,31579 &= \frac{15 \times 10^{-3}}{2 \times \sqrt{8,08 \times 10^{-6} \times t}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow t &= \frac{(15 \times 10^{-3})^2}{(2 \times 0,31579)^2 \times 8,08 \times 10^{-6}} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow t &\approx 69,8 \text{ s} \end{aligned}$$

Analisando os tempos obtidos, chegou-se à conclusão que se tratam de tempos aceitáveis, tendo em conta que a temperatura máxima de projecto é relativamente elevada. Como nota final deste ponto, os cartuchos escolhidos já incluem termopares integrados permitindo o total controlo das temperaturas praticadas durante todo o processo de injeção, o que simplifica a sua instalação. O autómato escolhido já possui uma carta específica para o controlo directo de temperatura.

Célula de carga

Uma célula de carga é classificada como um transdutor de força. Este dispositivo converte força ou peso num sinal eléctrico, sendo o extensómetro considerado como o elemento mais importante de uma célula de carga. Estes dispositivos mudam de resistência quando são deformados. Os extensómetros são desenvolvidos a partir de uma chapa metálica ultra fina que sofreu tratamentos térmicos e são unidos quimicamente a uma fina camada dieléctrica. Algumas partes dos mesmos são então ligadas a um elemento de tensão com adesivos especialmente concebidos para o efeito. Quando a superfície na qual o extensómetro está fixo é deformada, os mesmos comprimem ou estiram, mudando a sua resistência de forma proporcional à carga aplicada. A disposição de extensómetros mais utilizada é a configuração em Ponte de Wheatstone, disposição essa que quando uma tensão V é aplicada, a saída será uma tensão proporcional à força aplicada na célula; esta saída pode ser amplificada e processada através de circuitos próprios de instrumentação electrónica. Posto isto, de forma a conseguir-se realizar uma medida directa da força reactiva sofrida pelo êmbolo de injeção, e, consequentemente, um controlo preciso da pressão de injeção, tornou-se necessária a instalação de uma célula de carga na unidade redutora. Tal como foi demonstrado aquando do cálculo da força que o cilindro hidráulico poderia debitar, obteve-se um valor máximo desta, de 11 kN. Assim, e tendo em conta este mesmo valor, foi necessário seleccionar uma célula de carga capaz de suportar e medir forças desta ordem. Um dos critérios que foi tido em conta na escolha deste componente foi o seu tamanho, logo, escolheu-se uma célula de carga o mais compacta possível, o que facilitou a sua instalação no módulo de microinjeção. De maneira a controlar a força reactiva sofrida pelo êmbolo, a célula de carga teve de ser acoplada ao componente que permitia o movimento do mesmo, ou seja, à placa móvel. Para que este controlo fosse possível, surgiu a necessidade de se projectar duas peças de fixação: uma de secção

circular e que se assemelha a uma cápsula, dotando a célula de carga de uma protecção extra, e uma segunda peça, que surge como um complemento/extensão da placa móvel. A captação do sinal resultante da célula de carga é feita por uma carta específica que se encontra associada ao autómato. Todo este conjunto, célula de carga/sistema de fixação, encontra-se ilustrado em pormenor na Figura 12.

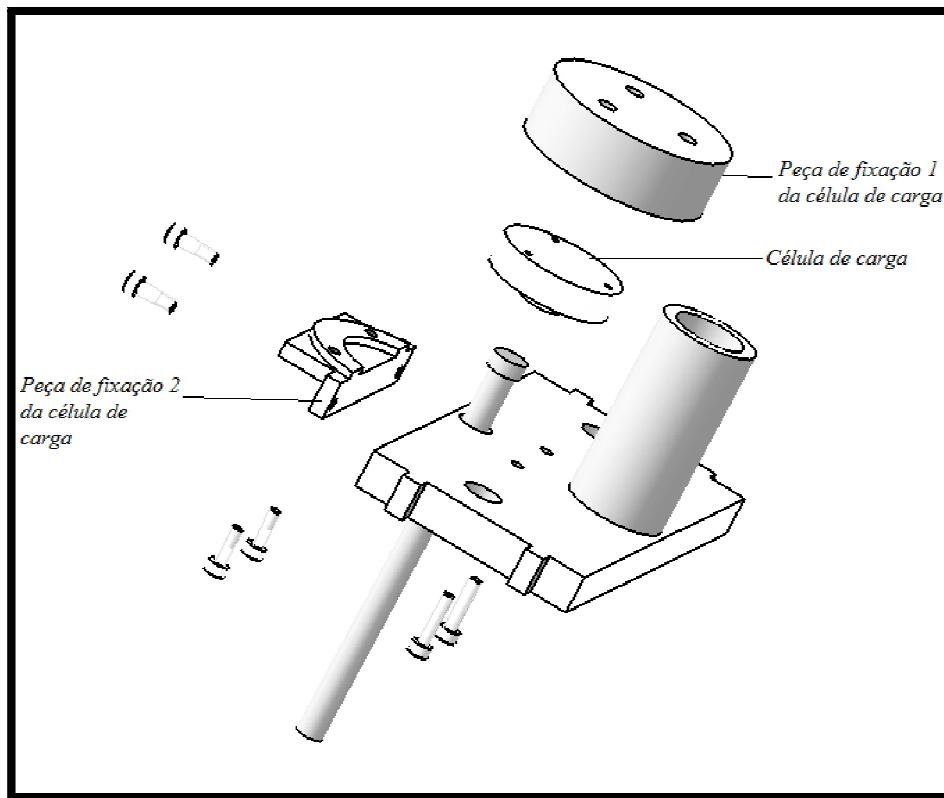


Figura 12: Célula de carga e respectivo sistema de fixação

4.4.2. Elementos de accionamento

Sistema de accionamento e controlo do êmbolo de injeção

Para que a transmissão de movimento ao êmbolo de injeção fosse o mais precisa possível, e tal como foi explicado anteriormente, optou-se pela aplicação de um cilindro hidráulico já com sistema de controlo e medida de posição integrado (transdutor absoluto de posição). Para que o movimento produzido por este fosse transmitido ao êmbolo de injeção, surgiu a necessidade de implementação de uma placa de transmissão com carácter móvel. É nesta que se encontra fixo o êmbolo. O guiamento da denominada placa

móvel é realizado por duas placas guia e por dois pinos guia, placas essas que servem também de apoio à fixação do cilindro a toda a aplicação. Para que o controlo directo da força reactiva sofrida pelo êmbolo, e consequentemente, o controlo de pressão fosse possível, foi acoplada uma célula de carga à placa móvel. Este acoplamento foi conseguido através do projecto de uma pequena peça, que se encontra fixa também à placa. A figura 13 ilustra o modo como este sistema foi projectado.

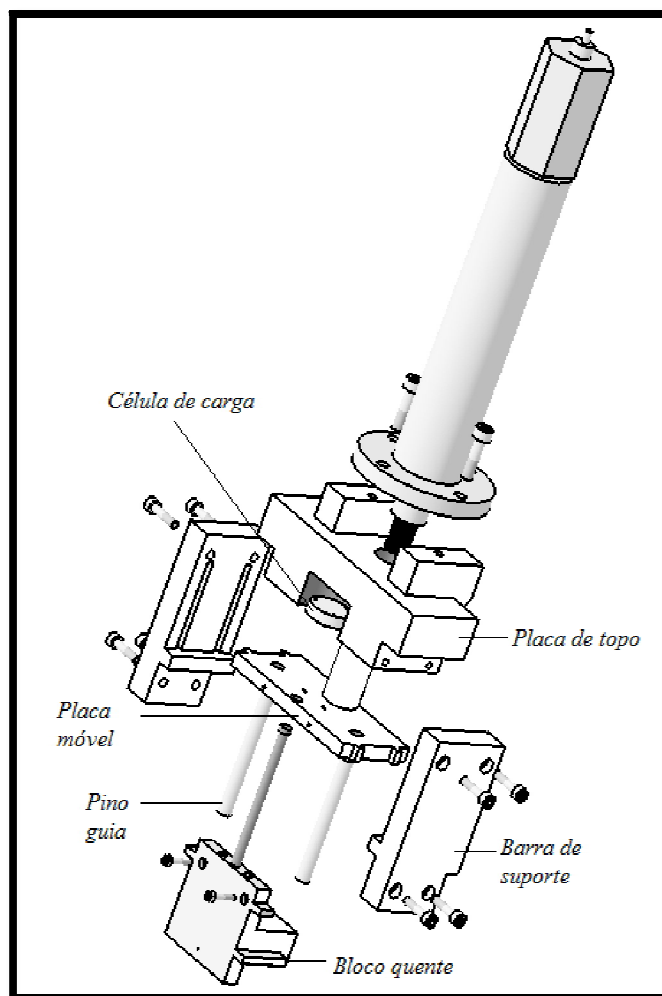


Figura 13: Perspectiva explodida do sistema de accionamento e controlo do êmbolo de injeção

Válvula de pino

Este componente não se trata de uma válvula convencional, mas sim de uma peça projectada para controlar e regular a saída de plástico da unidade redutora, cujo efeito e forma são semelhantes a um pino. Este controlo é conseguido devido a esta válvula estar acoplada a um mini actuador linear pneumático, o que permite a sua deslocação apenas na

direcção longitudinal. O curso deste actuador está limitado a 10 mm, o que foi considerado suficiente, uma vez que a válvula apenas necessita de se movimentar poucos milímetros para que o bico de injeção do bloco quente permita que o fluxo de material plasticizado ocorra no sentido da injeção para o molde. Sendo assim, esta válvula só actua após o volume de plástico necessário a injectar já estar no interior da câmara de injeção e também simultaneamente com a descida do êmbolo. Depois de concluída esta fase, a válvula fecha e um novo ciclo começa. De referir que foi projectada uma pequena peça para servir de sistema de fixação da válvula ao actuador linear. O confinamento proporcionado pela diminuição progressiva do diâmetro da cavidade onde a válvula de pino opera até atingir o valor de 1 mm (bico de injeção), confere ao fluido uma maior velocidade de injeção, o que acaba por ser necessário uma vez que os tempos de ciclo são muito curtos. A Figura 14 identifica a válvula de pino, bem como o sistema que permite realizar a sua actuação.

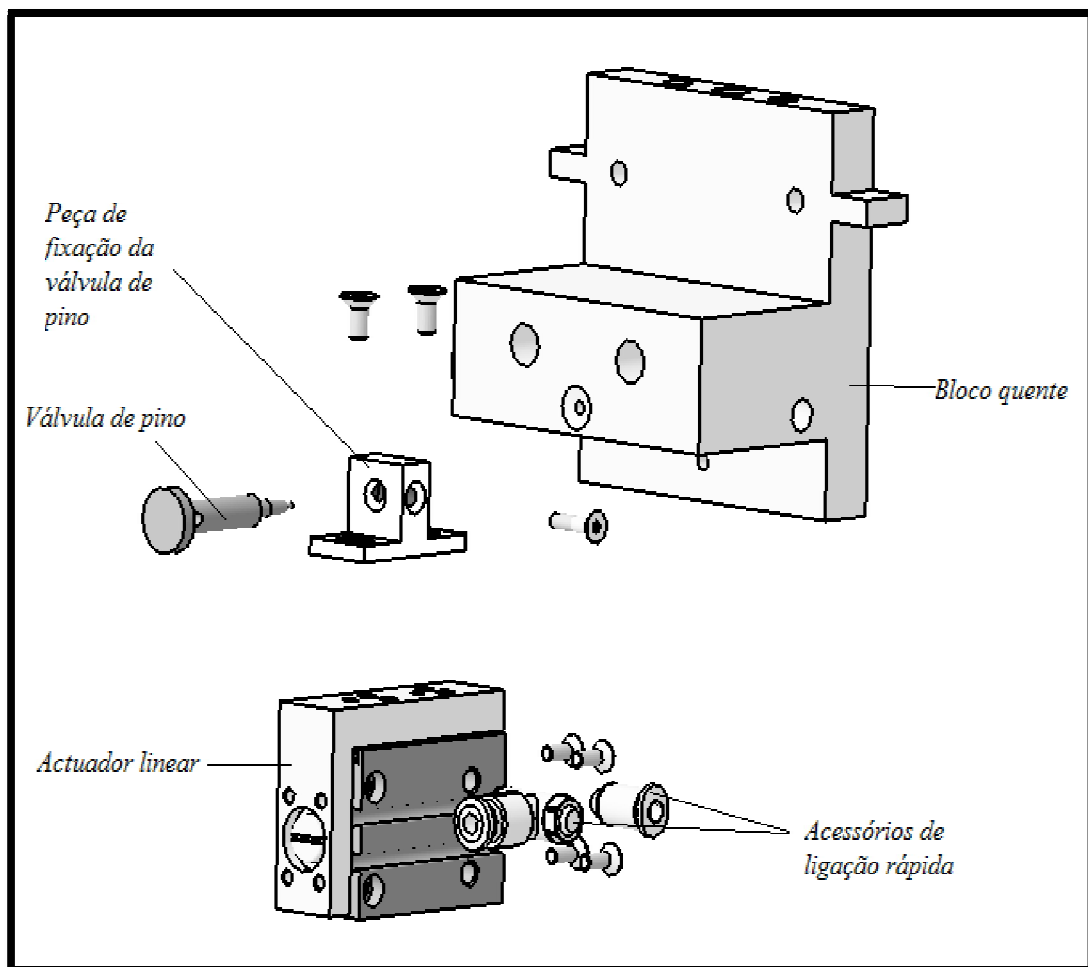


Figura 14: Perspectiva explodida do sistema de controlo da válvula de pino

Válvula rotacional

De forma análoga à anterior, este componente não se trata de uma válvula convencional, mas sim de uma peça que se tornou necessária modelar. A sua principal função é permitir o controlo do fluxo de material plasticizado que entra no bloco quente. Tal como *P.-C. Chang et al [9]* propuseram e tal como foi descrito anteriormente, esta válvula encontra-se instalada entre o canal quente por onde flui o plástico assim que entra na unidade redutora e o êmbolo de injeção. Aquando da entrada do material no bloco quente, dá-se a abertura da mesma, permanecendo aberta até que esteja finalizada a preparação da carga/volume de material a injectar. A válvula fecha quando o êmbolo inicia o seu movimento de avanço, o que evita que o polímero plasticizado recue. Para proporcionar o movimento rotacional a esta válvula, foi necessário instalar um actuador rotativo pneumático. O actuador escolhido apresenta: um fácil ajuste individual que pode variar entre os 0°-186° (o necessário para que a válvula rotacional produza o efeito desejado é de 90°); exigência de espaço reduzida, devido à sua construção compacta; um tipo de fixação por flange, o que facilitou a sua instalação na unidade redutora; sistema de detecção da posição de fim de curso composto por dois sensores indutivos, bem como um conjunto de fixação para a montagem dos mesmos. Para permitir a ligação entre este actuador e a válvula rotacional foi necessário modelar uma pequena peça que servisse de conector entre estes dois componentes. Por último, para fixar este sistema ao módulo de microinjecção, projectou-se uma placa de ligação, cujo propósito, além de servir de sistema fixante, foi proporcionar estabilidade a todo este conjunto. A Figura 15, de forma análoga à sua precedente, ilustra a válvula rotacional que foi modelada, assim como o seu sistema de accionamento e controlo.

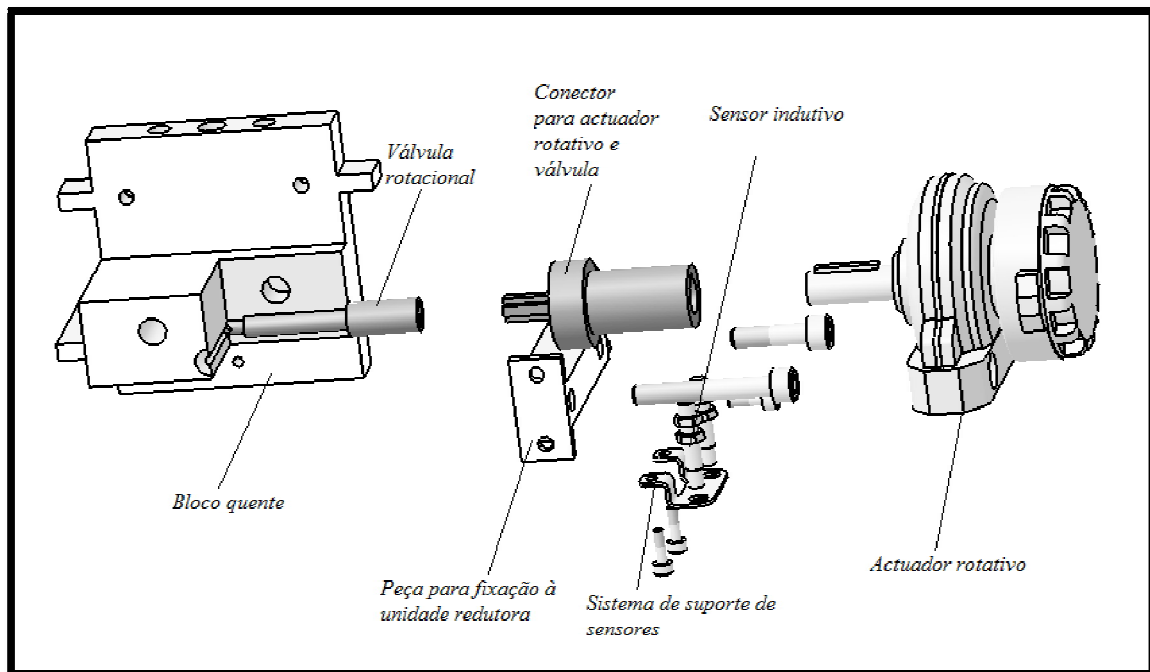


Figura 15: Perspectiva explodida do sistema de controlo da válvula rotacional

4.4.3. Elementos estruturais de montagem

Placa de Suporte

Esta placa foi modelada e projectada com o objectivo de garantir o suporte de toda a estrutura, bem como alojar alguns dos componentes constituintes da unidade redutora. Exemplos destes componentes são: bloco quente, actuador linear, válvula de pino, válvula rotacional, pinos guia e acessórios de ligação rápida do referido actuador. Esta placa estará em contacto directo com o molde que se deseja instalar na máquina de injeção. Permite também o suporte do sistema de actuação hidráulico e da placa onde o mesmo se fixa. A Figura 16 ilustra a modelação realizada desta placa.

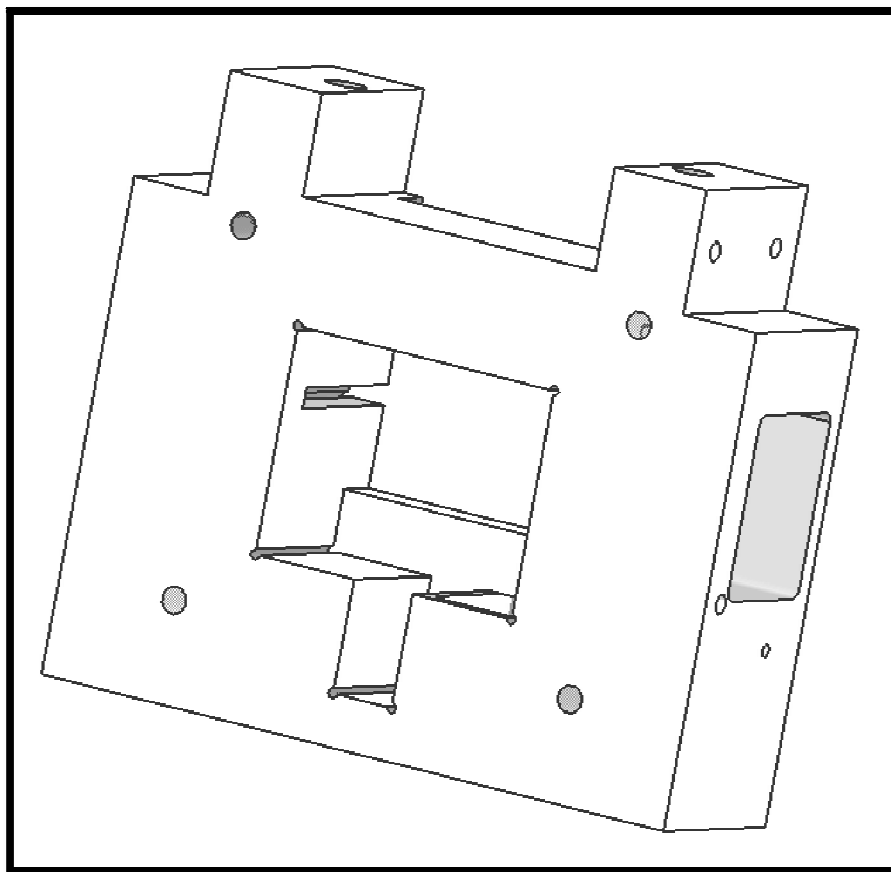


Figura 16: Placa de Suporte modelada

Placa de Topo

Este é um componente cuja principal função é garantir o suporte e fixação do cilindro hidráulico. Esta placa permanece fixa às duas barras de suporte existentes e que foram mencionadas anteriormente. Uma das suas particularidades é possuir um rasgo de secção circular, que permite a movimentação do sistema de fixação/protecção alocado à célula de carga de forma livre. Foi também implementado um furo que permite que o movimento linear do êmbolo do cilindro hidráulico, que está ligado à placa móvel, se realize. A Figura 17 representa a modelação realizada.

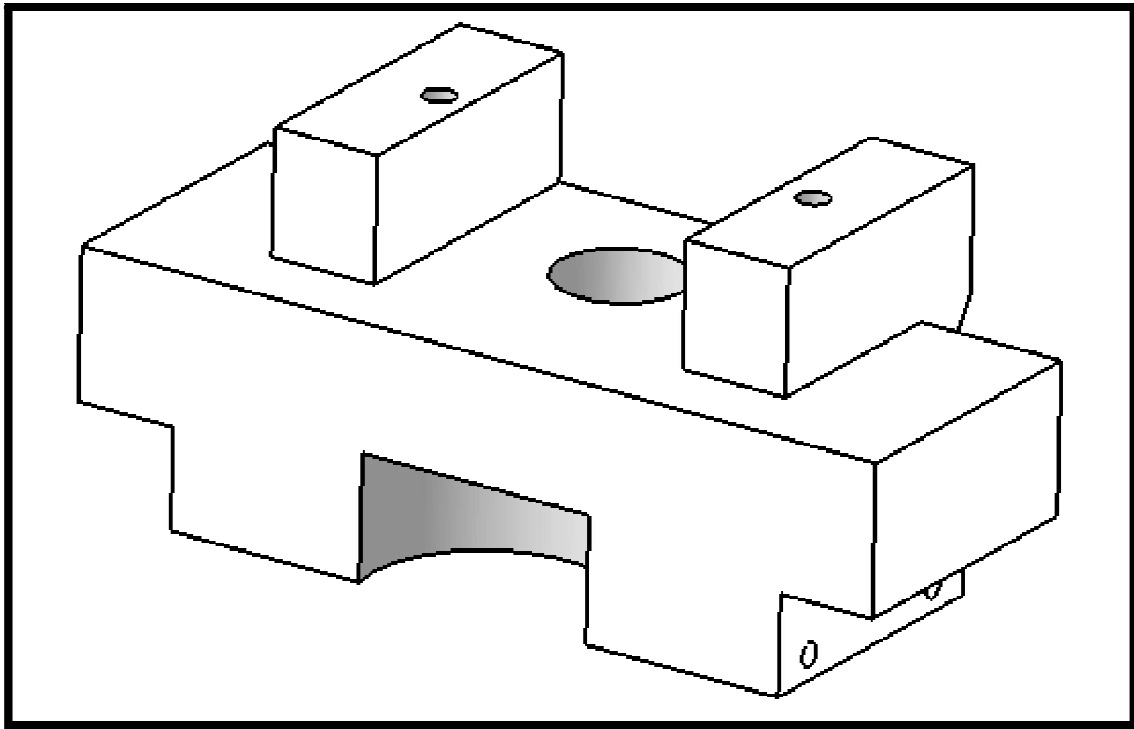


Figura 17: Placa de topo modelada

Placa móvel

Esta designação advém do facto de ser a esta placa que é proporcionado o movimento linear necessário para realizar a injeção de plástico para o molde, uma vez que o êmbolo de injeção se encontra fixo à mesma. Para que o seu guiamento fosse possível, e tal como descrito anteriormente, modelaram-se duas placas de suporte que possuem dois rasgos cada (com uma altura igual ao curso do cilindro, de 60 mm) através das quais a placa se irá movimentar, bem como dois pinos guia. Outro dos seus principais aspectos construtivos é a existência de um cilindro oco (M20x1,5), cuja função é receber e fixar o êmbolo do cilindro hidráulico, permitindo assim que lhe seja conferido o movimento linear necessário. Todo o sistema de guiamento, bem como a própria placa móvel e êmbolo de injeção, se encontram representados na Figura 18.

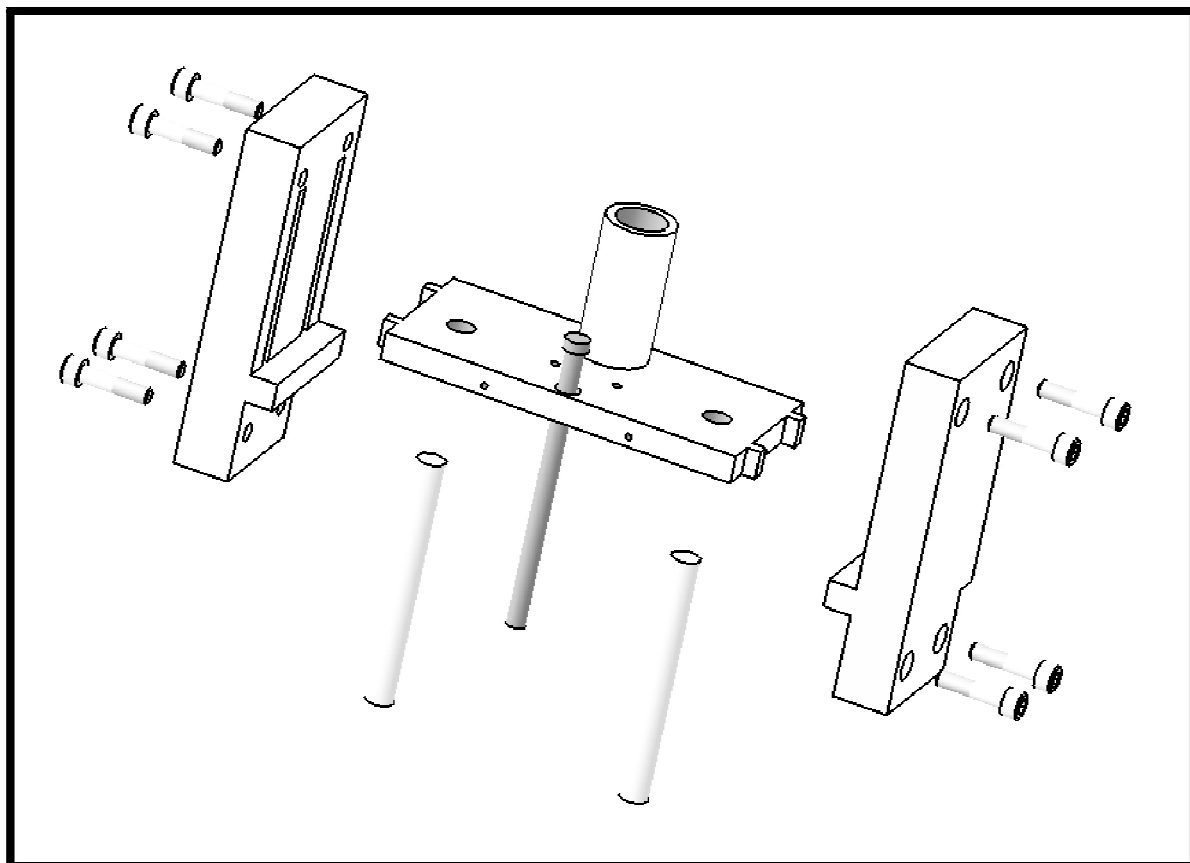


Figura 18: Placa móvel e seu sistema de guiamento

Placa de aperto

De acordo com as justificações apresentadas em 3.3.2. *Acoplamentos possíveis*, e o facto da unidade redutora ter sido projectada de forma a ser semelhante a um molde, levaram à necessidade de projecto desta placa. A sua função é então, a de permitir a ligação/fixação da unidade redutora à máquina de injeção. Todo o conjunto permanece ligado com esta peça através da placa de suporte. Como principais características surgem dois canais circulares, um em cada uma das suas faces laterais, que permitem a passagem dos cabos de dois dos cartuchos resistivos instalados; outra característica particular desta placa é o facto de ter surgido a necessidade de expandir para o seu interior a cavidade onde o actuador linear da válvula de pino irá trabalhar; possui também o espaço necessário para receber um anel de centragem. A placa de ligação encontra-se representada na Figura 19.

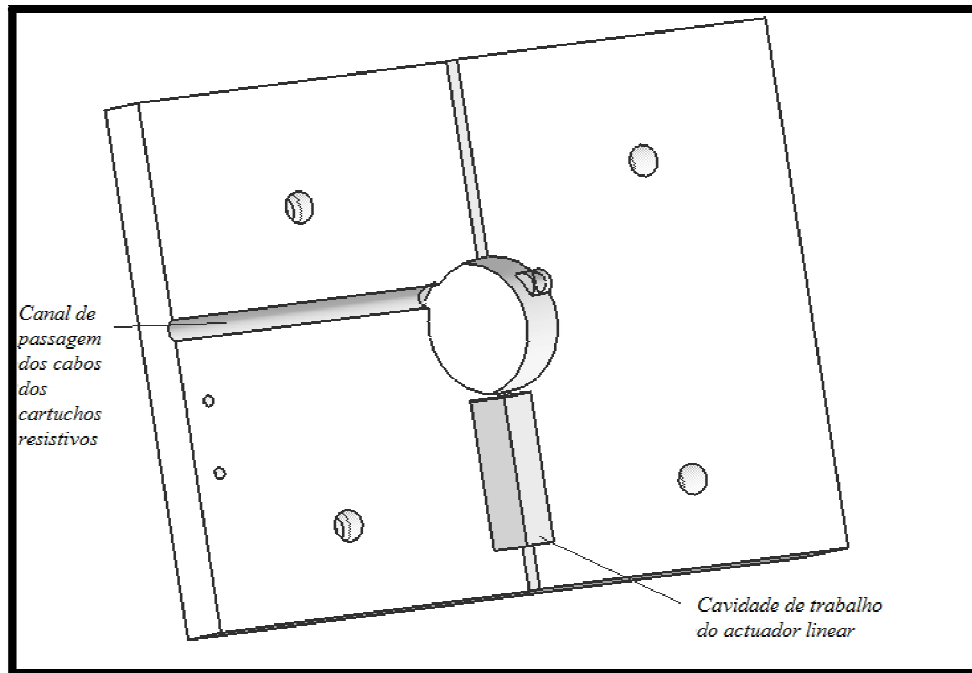


Figura 19: Placa de aperto, com vista em corte para uma melhor visualização do canal de passagem dos cabos dos cartuchos resistivos

4.4.4. Material aplicado: a todos os componentes não normalizados que fazem parte deste projecto, foi aplicado o aço como sendo o seu material base. A empresa fornecedora de aço escolhida foi a F.Ramada, Aços e Indústrias SA. Foram propostas pela mesma, três possibilidades de aços para este tipo de processo: Impax Supreme (dureza média, durabilidade média); Impax HH (maior dureza e durabilidade que o anterior); Orvar 2M (plásticos abrasivos, durabilidade elevada, elevado brilho). Tendo em conta as características apresentadas por cada aço, e como em microinjecção todo o controlo das variáveis de processamento do plástico são mais exigentes do que no processo de injecção convencional, optou-se apenas por se aplicar dois dos três aços que aqui foram apresentados: o Impax HH e o Orvar 2M. As características termo-físicas dos mesmos estão apresentadas nas Tabelas 8 e 9 respectivamente.

Tabela 8: Propriedades físicas do aço Impax HH. Adaptado de [23]

Impax HH		
Temperatura	20 °C	200 °C
Densidade [kg/m³]	7 800	7 750
Coefficiente de expansão térmica por °C a partir de 20 °C	-	12,7 x 10 ⁻⁶
Condutividade térmica [W/m.°C]	29	30
Módulo de elasticidade [N/mm²]	205 000	200 000
Calor específico [J/kg.°C]	460	-

Tabela 9: Propriedades físicas do aço Orvar 2M. Adaptado de [24]

Orvar 2M			
Temperatura	20 °C	400 °C	600 °C
Densidade [kg/m³]	7 800	7 700	7 600
Coefficiente de expansão térmica por °C a partir de 20 °C	-	12,6 x 10 ⁻⁶	13,2 x 10 ⁻⁶
Condutividade térmica [W/m.°C]	25	29	30
Módulo de elasticidade [N/mm²]	210 000	180 000	140 000
Calor específico [J/kg.°C]	460	-	-

Segundo as características anteriores, foi estabelecido que o aço Orvar 2M seria o desejado para dar forma aos componentes que estivessem em contacto directo com o material polimérico durante o ciclo de injeção. A todos os outros, e uma vez que a sua acção no processo não implica um contacto directo com o plástico, foi definido que seriam fabricados a partir do aço Impax HH. Sendo assim, a Tabela 10 indica quais os componentes a que foram aplicados cada um destes materiais.

Tabela 10: Identificação dos componentes associados a cada um dos aços escolhidos

Orvar 2M	Bloco quente
	Êmbolo de injeção
	Válvula de pino
	Válvula rotacional
Impax HH	Placa de ligação
	Placa de suporte
	Barras de suporte
	Placa de topo
	Pilares guia
	Placa de suporte do êmbolo
	Conector da válvula rotacional com actuador rotativo
	Peça de fixação do actuador rotativo
	Peça de fixação da válvula de pino
	Placa móvel
	Peças de fixação da célula de carga

4.4.5. Conjunto final: Uma vez apresentado o projecto, as modelações realizadas para cada peça constituinte da unidade redutora, bem como a sua descrição detalhada e a justificação de todas as opções tomadas, esta secção surge como sendo a apresentação do resultado final deste trabalho. As Figuras 20 e 21

representam o conjunto total das peças modeladas, e que concretizam o projecto desta unidade redutora/módulo externo de microinjecção. De referir que foram atribuídas diferentes cores a cada um dos componentes no sentido de se verificar uma melhor identificação dos mesmos.

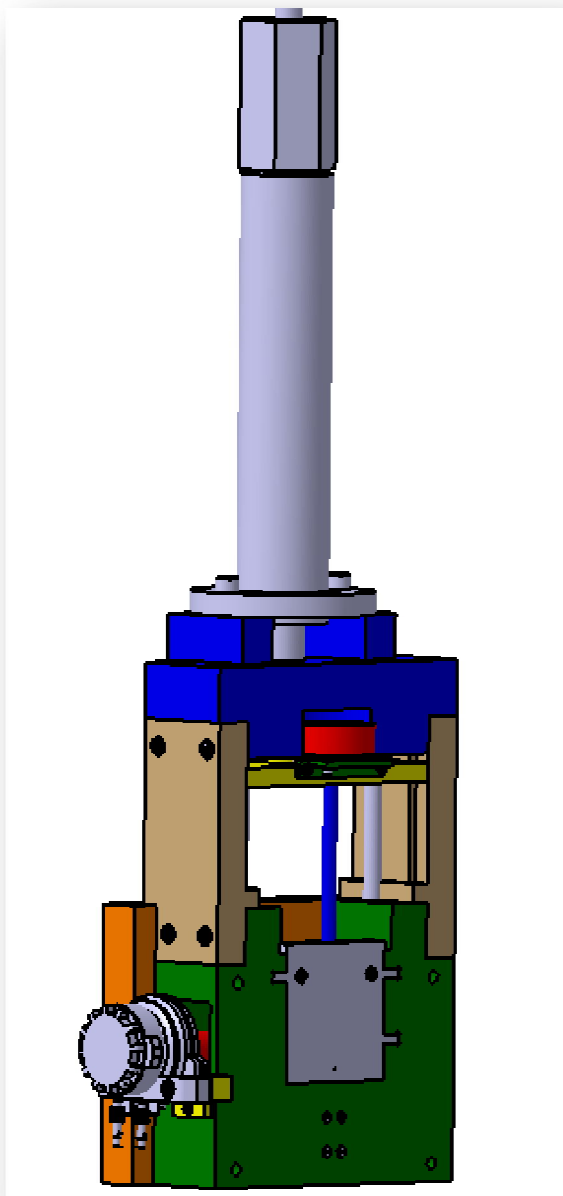


Figura 20: Apresentação do resultado da assemblagem de todos os componentes constituintes da unidade redutora/módulo de microinjecção

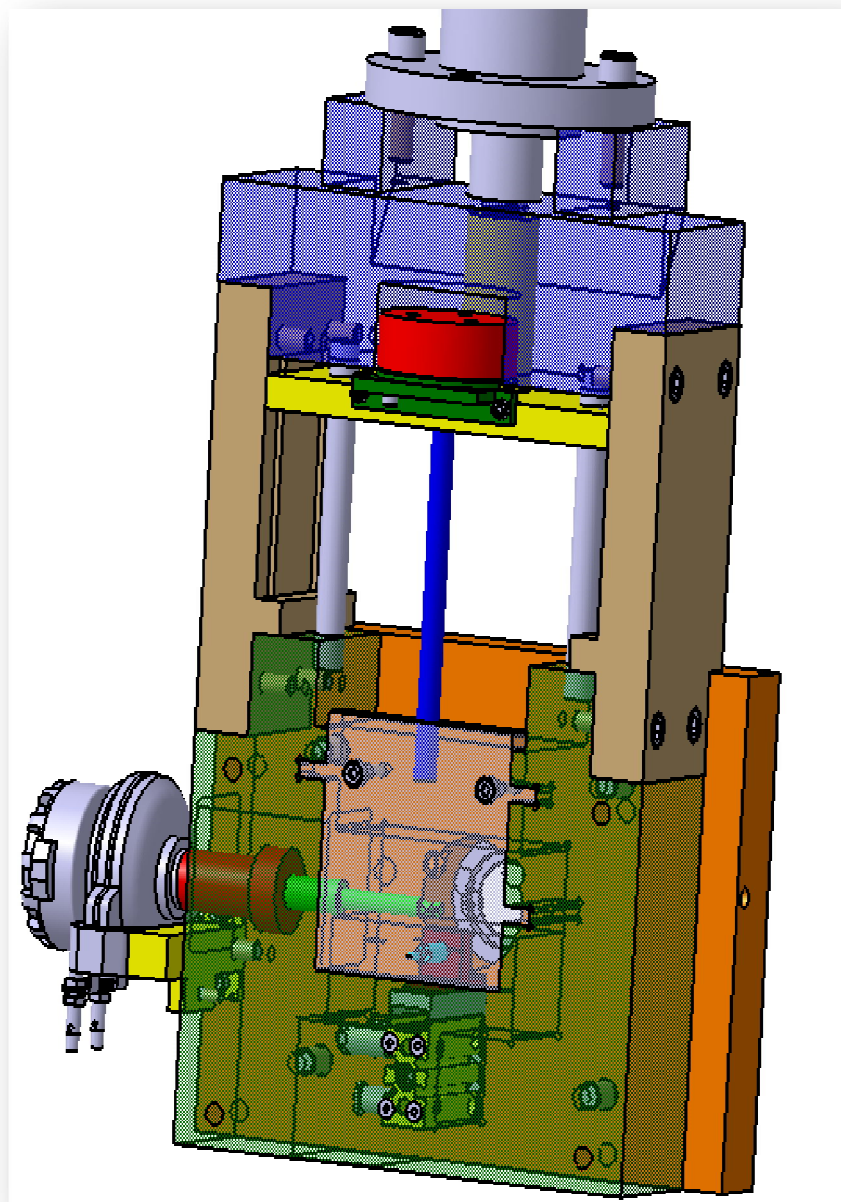


Figura 21: Unidade redutora/módulo externo de microinjecção, vista de uma perspectiva diferente da figura anterior, onde alguns dos seus constituintes aparecem aqui semi-transparentes de maneira a proporcionar uma melhor visualização da montagem do sistema

5. Caderno de Encargos

Para a realização deste caderno de encargos, foram tidos em conta os critérios referidos anteriormente. Assim, fez-se uma tentativa de minimização dos custos associados à produção de peças não normalizadas, bem como, se procedeu sempre que possível, à escolha de componentes com a melhor razão custo/benefício. Estes vieram de encontro à conjuntura económica actual, a qual não é a mais favorável em termos de possibilidades de investimento, considerando ainda o facto de este projecto ter sido realizado num meio académico. Sendo assim, existiu a necessidade de estabelecer contactos com empresas especializadas na produção, fabrico ou representação/comercialização dos diferentes componentes constituintes da unidade redutora/módulo de microinjecção. Foram então pedidos vários orçamentos para:

- todos os sistemas normalizados;
- os aços utilizados;
- todos os sistemas de controlo de variáveis;
- produção e fabrico das peças necessárias.

Assim, e indo de encontro ao que acabou de ser descrito, a Tabela 11 sintetiza o caderno de encargos efectuado, isto é, demonstra todos os custos associados ao projecto desta unidade redutora, identificando as escolhas efectuadas no que aos fornecedores de cada componente diz respeito, bem como às quantidades, preços unitários e custo final do sistema em questão. De referir que, no custo total associado a cada aço, o valor apresentado na referida tabela, resulta da soma da massa dos diferentes componentes cuja produção será feita a partir de cada um deles (ver Tabela 10). Como nota, é de mencionar que todos os componentes Festo são distribuídos em Portugal pela empresa Mota & Teixeira, SA. O gráfico apresentado na Figura 22 demonstra qual a percentagem que cada grupo de equipamento representa no custo total do projecto

Tabela 11: Tabela de custos da unidade redutora

Caderno de encargos do módulo externo de microinjecção				
Componente	Fornecedor	Quantidade	€unidade	€- total
Actuador rotativo DSR-16-180-P	Festo	1	157,61	157,61
Flange de fixação FSR-16	Festo	1	35,74	35,74
Sensor Indutivo SIEN-M5B-PS-K-L	Festo	2	54,04	108,08
Kit de montagem WSR-16-J-M5	Festo	1	3,85	3,85
Unidade linear SLS-6-10-P-A	Festo	1	231,01	231,01
Acessório de ligação rápido QSM-B-M5-4-I-20	Festo	1	1,31	1,31
Acessório de ligação rápido QSK-M5-4	Festo	1	7,86	7,86
Célula de carga KAM-B/10kN	AST	1	435	435
Aço ORVAR 2M	F.RAMADA	0,965 kg	9,30€/kg	8,97
Aço IMPAX HH	F.RAMADA	18,751 kg	3,60€/kg	67,50
Anel de centragem	DME	1	38,81	38,81
Cilindro hidráulico c/ transdutor de posição	Teclena	1	1100	1100
Célula de carga KAM-B	AST	1	435	435
PLC: FBs-20MA; FBs-RTD6; FBs-B2A1D	Prosistav	1;1;1	236,90; 259,11; 76,50	572,51
Resist. Cartucho D6,5x50mm 230V-250W C/ TC	Resitec	2	26,70	53,40
Resist. Cartucho D8x40mm 230V-250W C/ TC	Resitec	2	27,10	54,20

Tabela 11: Tabela de custos da unidade redutora (continuação)

Electroválvulas monoestáveis 5/2 Tensão 24VDC, roscadas em M5 e cabos de ligação (CPE10-M1BH-5L-M5)	Festo	2	-	168,04
Maquinagem e Produção	MoldAveiro	-	-	2585€
Parafusos				
SM 5x12	DME	2	0,52	1,04
M8x30 DIN 12.9	DME	4	0,29	1,16
M6x25 DIN 12.9	DME	8	0,22	1,76
M4x10 DIN 12.9	DME	3	0,22	0,66
M3x10 DIN 12.9	DME	6	0,20	1,20
M4x14 DIN 12.9	DME	2	0,22	0,44
M4x20 DIN 12.9	DME	2	0,22	0,44
SM 4x8	DME	2	0,48	0,56
SM 3x12	DME	1	0,63	0,63
SM 3x8	DME	4	0,63	2,52
			TOTAL	5639,31€

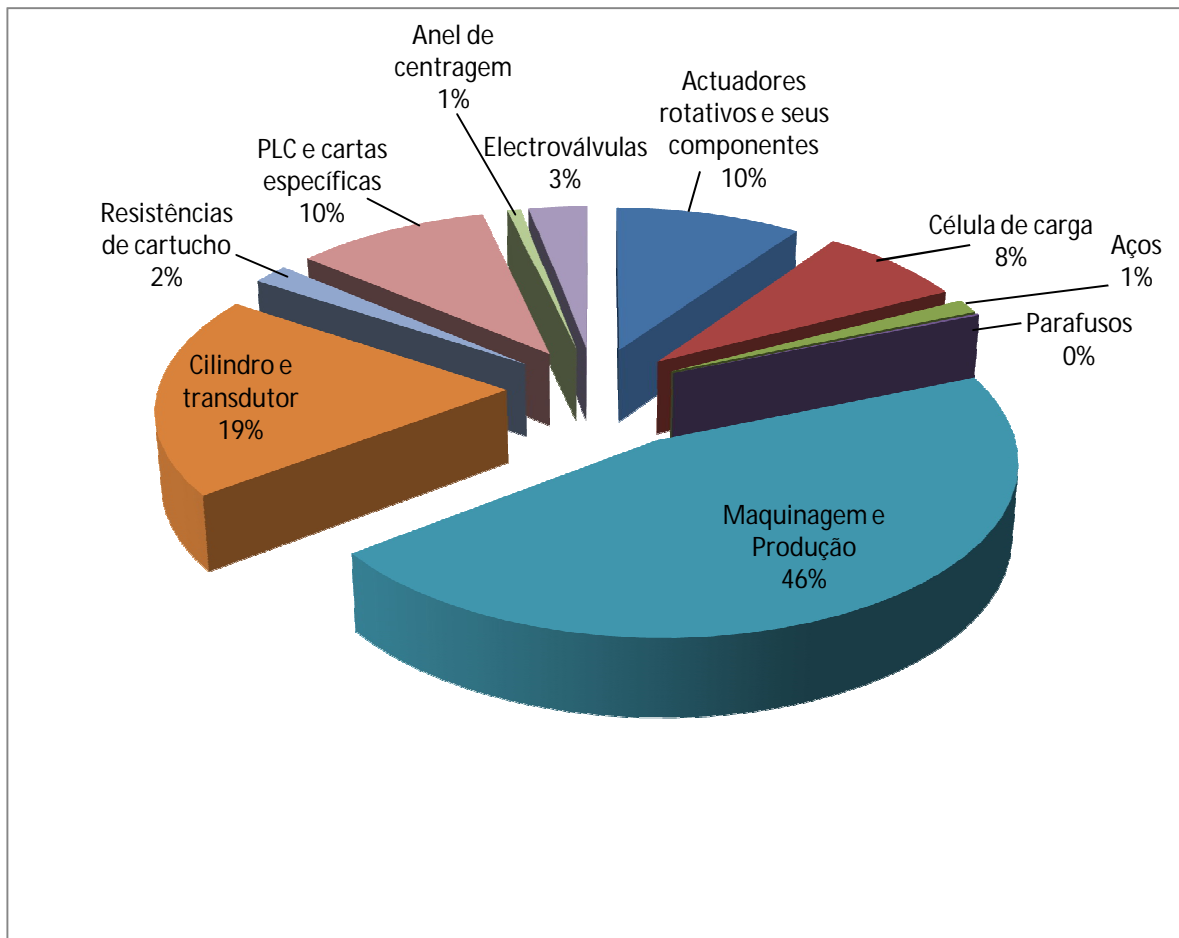


Figura 22: Gráfico representativo da percentagem de custo associada a cada grupo de equipamentos, tendo em conta o custo total da unidade redutora

Analisando o gráfico anterior (Figura 22), verifica-se que a maior percentagem do custo total está associada ao processo de maquinagem e produção da unidade redutora, apresentando assim um peso de 46% do preço final. De referir, que a percentagem correspondente ao custo de aquisição de todos os parafusos aparece aqui como nula, uma vez que este é bastante menor relativamente aos restantes valores envolvidos, sendo a sua percentagem real de 0,18% do custo total.

6. Conclusões e trabalho futuro

O crescimento da indústria de moldes Portuguesa tem vindo a estabelecer-se num caminho de consolidação e de notoriedade no mercado internacional, quer pela procura externa, quer por uma competitiva relação qualidade/preço/prazos de entrega. Portugal, num universo de cerca de 535 empresas dedicadas ao fabrico de moldes e ferramentas especiais, encontra-se entre os maiores fabricantes mundiais deste sector, nomeadamente na área dos moldes de precisão para a indústria de plásticos, o que se torna um facto representativo de que ao longo dos anos o país tem demonstrado uma elevada capacidade de adaptação às necessidades dos seus clientes e às evoluções, quer dos mercados, quer das tecnologias.

Foi principalmente para este propósito que este trabalho foi pensado e realizado. Todo o sistema da unidade redutora modelada poderá permitir a adaptação das empresas nacionais aos desafios constantes de redução de escala que o presente e futuro reservam. Além disso, a implementação deste sistema pode proporcionar uma minimização de custos, uma vez que, para realizar injeções de micropeças, não será necessário existirem elevados investimentos na aquisição de máquinas específicas de microinjecção, uma vez que, ao aplicar-se esta unidade redutora (investimento de cerca de 5640€) as máquinas existentes poderão executar as operações de microinjecção quando desejado.

Um problema que poderia ser levantado em relação à instalação de um equipamento deste tipo em máquinas de injeção convencionais prende-se com os gastos energéticos associados ao funcionamento das próprias máquinas. Seria plausível pensar que não compensasse injectar uma quantidade de material tão reduzida, tendo em conta esses mesmos gastos energéticos. O que se pode concluir é que o sistema em que recai todo este trabalho evita desde logo desperdícios excessivos de material plástico, uma vez que para se realizar operações de microinjecção em máquinas convencionais verifica-se o problema dessas grandes perdas, tendo em conta o tamanho das peças a produzir. A unidade redutora apresenta-se como um sistema compacto, de fácil instalação/fixação (a sua placa de aperto, tal como foi dito, permite uma fixação à máquina por aperto manual, sendo esta a forma mais usual), de aplicação em máquinas com diferentes dimensões, de baixo custo comparativamente à aquisição de uma máquina de microinjecção, e que proporciona um controlo total de todas as variáveis de injeção (velocidade de injeção, volume de injeção,

pressão de injeção e temperatura de plasticização). Todos estes factores compensam os possíveis gastos energéticos associados a uma injeção com a unidade redutora instalada.

Assim como foi dito na *Secção 4.1. Apresentação do sistema proposto*, este equipamento necessita que as máquinas de injeção respeitem pelo menos dois parâmetros principais. São eles:

- Pressão hidráulica ≥ 140 bar;
- Diâmetro do fuso de injeção máximo igual a 60 mm.

Considerando a marca da qual faz parte a máquina de injeção existente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, a Euro-Inj, verificou-se que, entre os modelos que a mesma fabrica, todos eles respeitam o primeiro dos parâmetros apresentados, uma vez que a pressão hidráulica de 140 bar é característica comum a todos; em relação ao segundo dos parâmetros, verificou-se que as máquinas injectoras que o respeitam vão desde a gama Euro-Inj D65 até à gama Euro-Inj D170.

A instalação de um sistema deste tipo em equipamentos muito grandes não se justifica, uma vez que são preparados para injectar grandes quantidades de plástico e para albergar moldes de grandes dimensões. Como em microinjeção o tamanho dos moldes utilizados é proporcional ao tipo de peças, e por sua vez, a força de fecho das máquinas depende da área projectada dos próprios, chegou-se à conclusão que a instalação da unidade redutora (bem como do molde que seria necessário acoplar à mesma) em máquinas de grande dimensão não se justificaria, uma vez que neste caso os grandes desperdícios de energia provavelmente não seriam compensados com os benefícios inerentes a um sistema deste tipo, e também porque não estariam preparadas para receber equipamentos tão pequenos.

Como na maioria dos casos, a unidade redutora desenvolvida neste trabalho não se trata de um equipamento de injeção cuja aplicação se possa considerar universal, uma vez que permite proporcionar parâmetros de injeção dentro de limites específicos. Desde logo:

- Volume de injeção $\leq 2,934 \text{ cm}^3$;
- Pressão de injeção de 2200 bar;
- Diâmetro do êmbolo de injeção de 8 mm;

- Temperatura máxima de plasticização de 400 °C;
- Velocidade de injeção de 909,1 mm/s.

Caso exista a necessidade de estes parâmetros de injeção não corresponderem às necessidades exigidas, teria de haver um redimensionamento de variáveis, quer a nível do sistema de actuação (cilindro hidráulico), quer das resistências de cartucho, quer do dimensionamento dos diferentes componentes. Logo, como não se procederá ao fabrico em série da unidade redutora, para satisfazer qualquer necessidade que ultrapasse os limites definidos, estas adaptações podem ser facilmente conseguidas, uma vez que este trabalho descreve pormenorizadamente todos os resultados obtidos e também possui todos os desenhos de definição necessários.

A modelação de todo este conjunto tornou-se um desafio exigente, uma vez que o domínio da ferramenta de desenho (Catia V5) era necessário. A realização do mesmo implicou conhecimentos em diversas áreas de Engenharia Mecânica, como por exemplo: projecto e fabrico de moldes, transferência de calor, concepção e desenvolvimento de produto e materiais. Tal como dito anteriormente, os objectivos de minimização dimensional e de custos foram atingidos, na medida em que diferentes orçamentos foram pedidos, sendo que, a escolha final recaiu naqueles que apresentaram, para um mesmo componente, um valor mais baixo.

De referir que as principais dificuldades encontradas, centraram-se principalmente na obtenção de resposta aos vários pedidos de orçamento realizados às diferentes empresas contactadas.

Como principais trabalhos futuros, deixam-se aqui várias sugestões que poderão ser levadas em conta:

- surge desde logo a necessidade de produção e fabrico desta unidade redutora, no sentido de concretizar o projecto;
- uma vez realizada essa fase, seria necessário implementar toda a programação do autómato e respectiva instrumentação do sistema. Ter um sistema real e funcional poderá assim proporcionar uma percepção exacta do comportamento exacto do sistema virtual;
- posto isto, seria necessário iniciar uma nova fase: a fase de testes;
- a partir do ponto anterior, seguir-se-ia a optimização de todo o processo para que os interesses académicos e de investigação desejados pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, consigam ser alcançados.

1. Referências

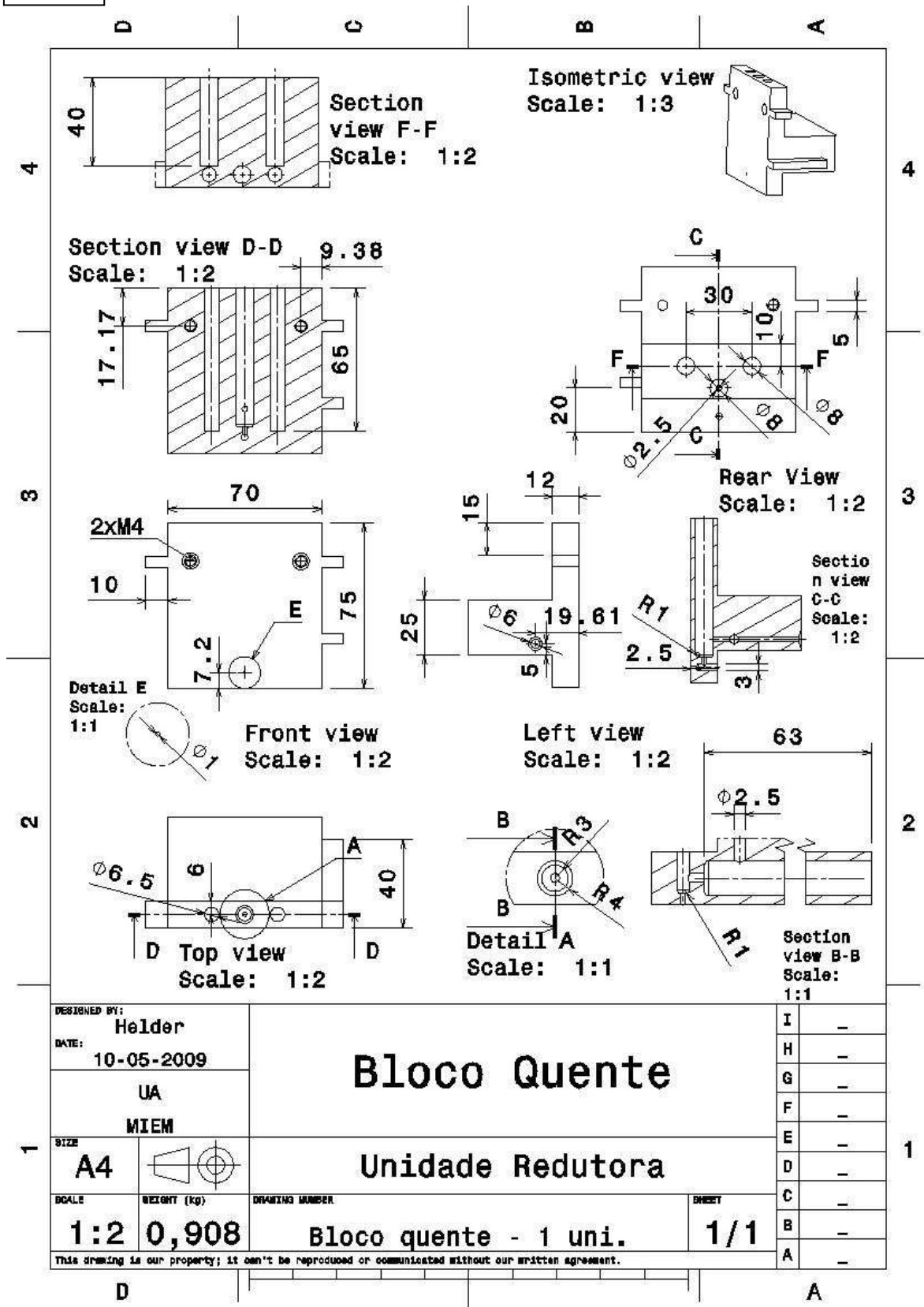
1. Donald V. Rosato, D.V.R., ed. Injection Molding Handbook, the complete molding operation technology, performance and economics. Second Edition ed. 1995, Chapman & Hall.
2. <http://media-2.web.britannica.com/eb-media/62/1662-004-F7EE1007.gif> (Processo de injeção), Consultado em Março, 2009.
3. Reis, D.d.C., Modelação do processo de moldação por injeção utilizando redes neuronais artificiais in Departamento de Engenharia Mecânica. 2007, Universidade de Aveiro: Aveiro.
4. <http://www.machinerylubrication.com/Backup/200305/IndFoc-Fig1.jpg> (máquina de injeção convencional), Consultado em Março, 2009.
5. Julien Giboz, T.C., Patrice Mélé, Microinjection molding of thermoplastic polymers: a review. Journal of micromechanics and microengineering, 2007. 17(6): p. 96-109.
6. M Hecke, W.S., Review on micro molding of thermoplastic polymers. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004. 14(3): p. 1-14.
7. Whiteside B R, M.M.T.a.C.P.D., In process monitoring of micromoulding—assessment of process variation. Int. Polymer Process, 2005. 20: p. 162–9.
8. Zhao, J., et al., Polymer micromould design and micromoulding process. Plastics Rubber and Composites, 2003. 32(6): p. 240-247.
9. Pei-Chi Changa, S.-J.H., Huei-Huang Lee, Durn-Yuan Huangc, Development of an external-type microinjection molding module for thermoplastic polymer Journal of Materials Processing Technology, 2006. 184(1-3): p. 163-172.
10. Martyn M T, Whiteside B, Coates P D, Allan P S and Hornsby P 2002 Studies of the process-property interaction of the micromoulding process SPE ANTEC
11. Santos, T.M.d., Simulação Computacional do Processo de Micro Injeção, in Departamento de Engenharia Mecânica. 2008, Universidade de Aveiro: Aveiro.
12. Christian, G., Injection Moulding of Parts with Microstructured Surfaces for Medical Applications. Macromolecular Symposia, 2004. 217(1): p. 365-374.

13. Michaeli, W., A. Spennemann, and R. Gartner, New plastification concepts for micro injection moulding. *Journal of Polymer Engineering*, 2004. 24(1-3): p. 81-93.
14. <http://www.microbridge.cf.ac.uk/files/Micro%20injection%20moulding%20machine%20Microsystem%2050%20Battenfeld.JPG> (máquina de microinjecção), Consultado em Março, 2009.
15. Gärtner, H.B.C., Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2008. 390: p. 89-111.
16. NEXUS, Market Analysis for MEMS and Microsystems III. 2005–2009, NEXUS.
17. Lien Yu Machinery CO, L., Injection Molding Machine Series, L. INAUTOM-Automação, Editor. 1996.
18. Centimfe, ed. Manual do Projectista para moldes de injeção de plástico. 2004, ColorEstudio - Artes Gráficas Lda.
19. Projecto e Fabrico de Moldes e Ferramentas, DEM-UA, Acetatos das aulas, Aula 2, 2008-2009
20. Shen, Y.K., Y.J. Shie, and W.Y. Wu, Extension method and numerical simulation of micro-injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2004. 31(6): p. 795-804.
21. Sha, B., et al., Micro-injection moulding: Factors affecting the achievable aspect ratios. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007. 33(1-2): p. 147-156.
22. Frank P. Incropera, D.P.D., Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, ed. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th Edition ed. 2007, John Wiley & Sons: Hoboken. pag: 116-122, 283-290, 961.
23. UDDEHOLM, Impax Hi Hard, F. Ramada, Aços e Indústrias SA.
24. UDDEHOLM, Orvar Supreme, F. Ramada, Aços e Indústrias SA.

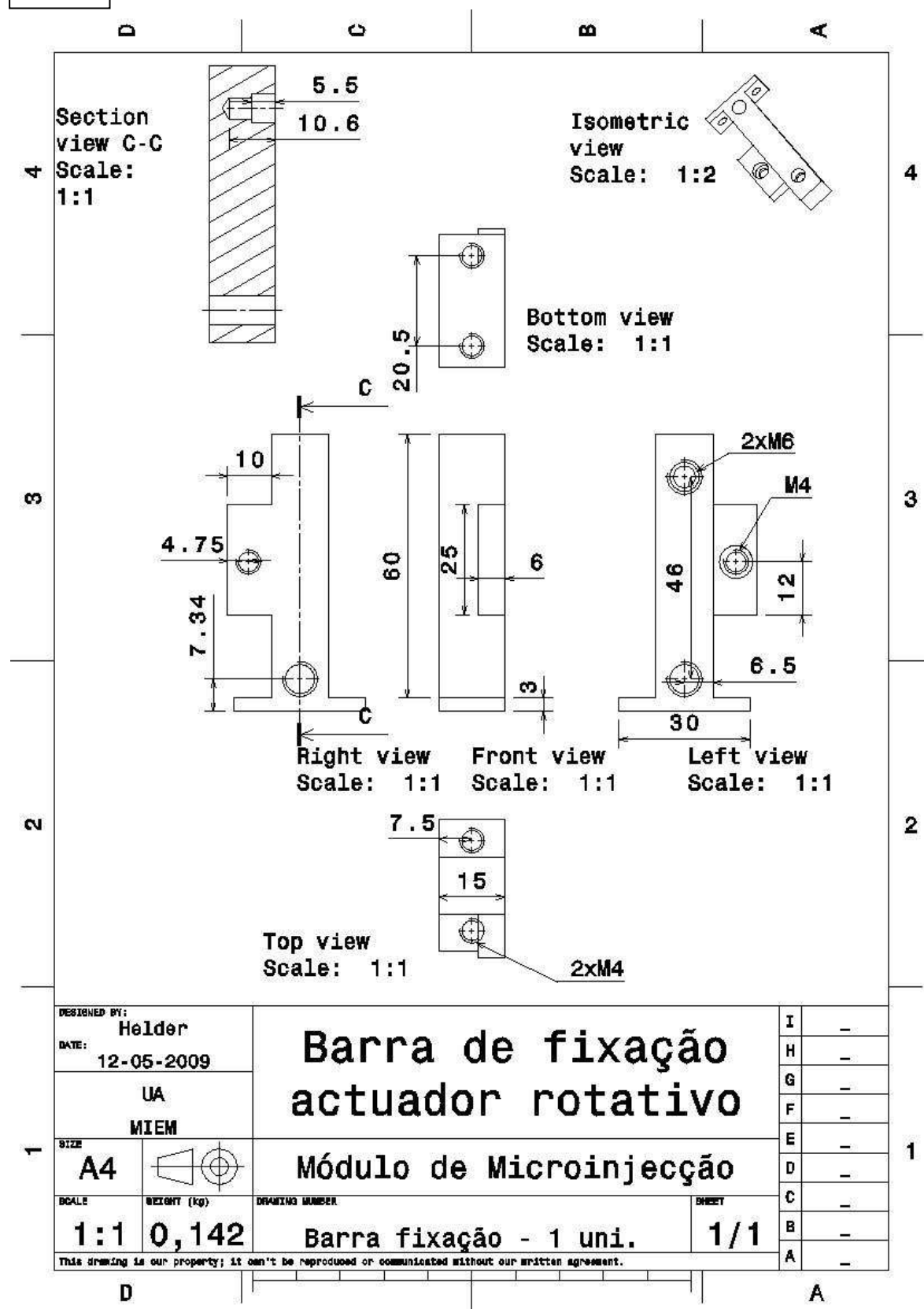
8. Anexos

- 8.1. Bloco quente;
- 8.2. Barra de fixação do actuador rotativo;
- 8.3. Barra de suporte;
- 8.4. Conector para actuador rotativo;
- 8.5. Fixação da válvula de pino;
- 8.6. Peça de fixação para placa de montagem;
- 8.7. Pilar guia;
- 8.8. Placa de aperto;
- 8.9. Placa de montagem da célula de carga;
- 8.10. Placa de suporte;
- 8.11. Placa de topo;
- 8.12. Placa móvel;
- 8.13. Válvula de pino;
- 8.14. Válvula rotacional;
- 8.15. Êmbolo de injeção;

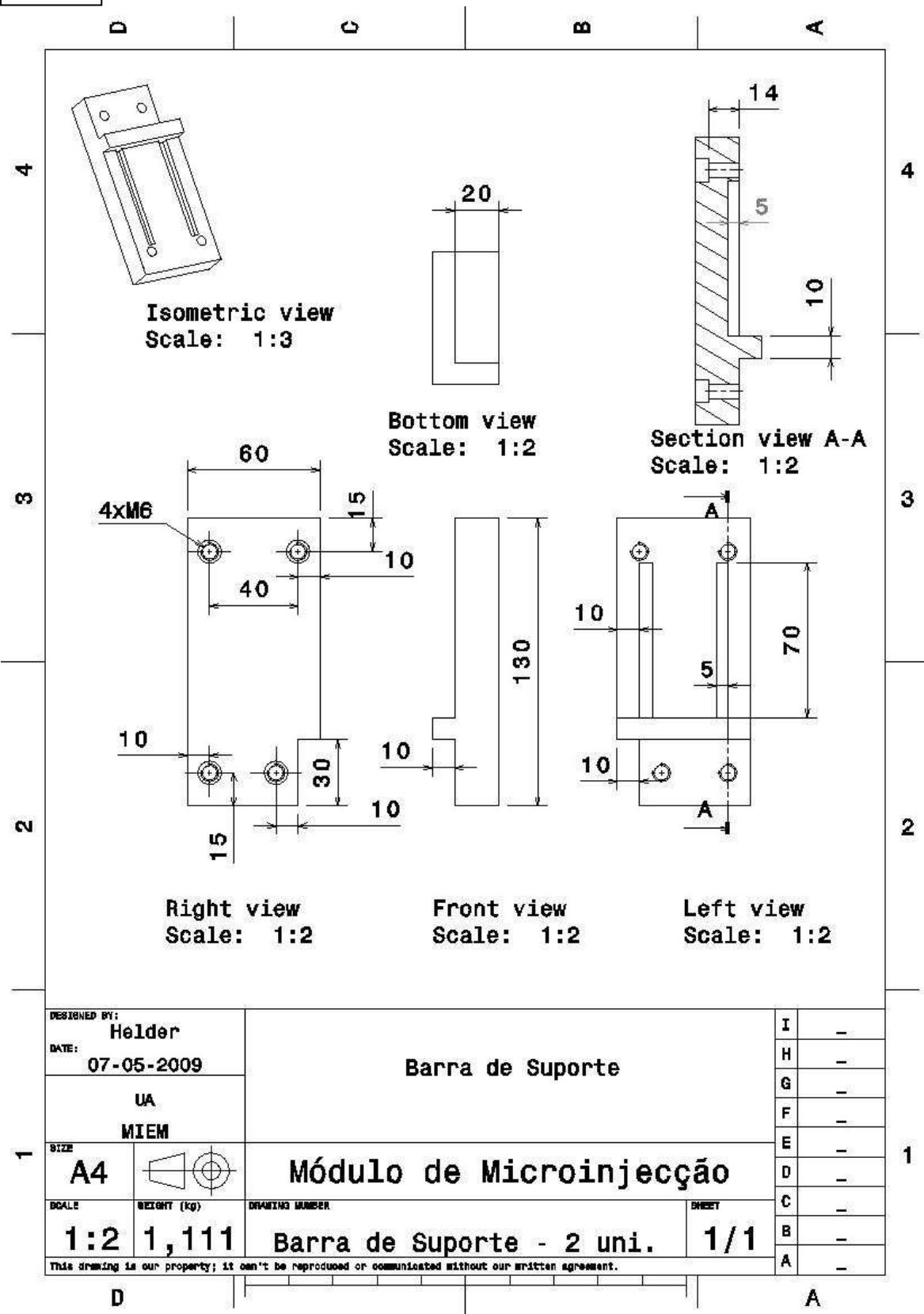
8.1.



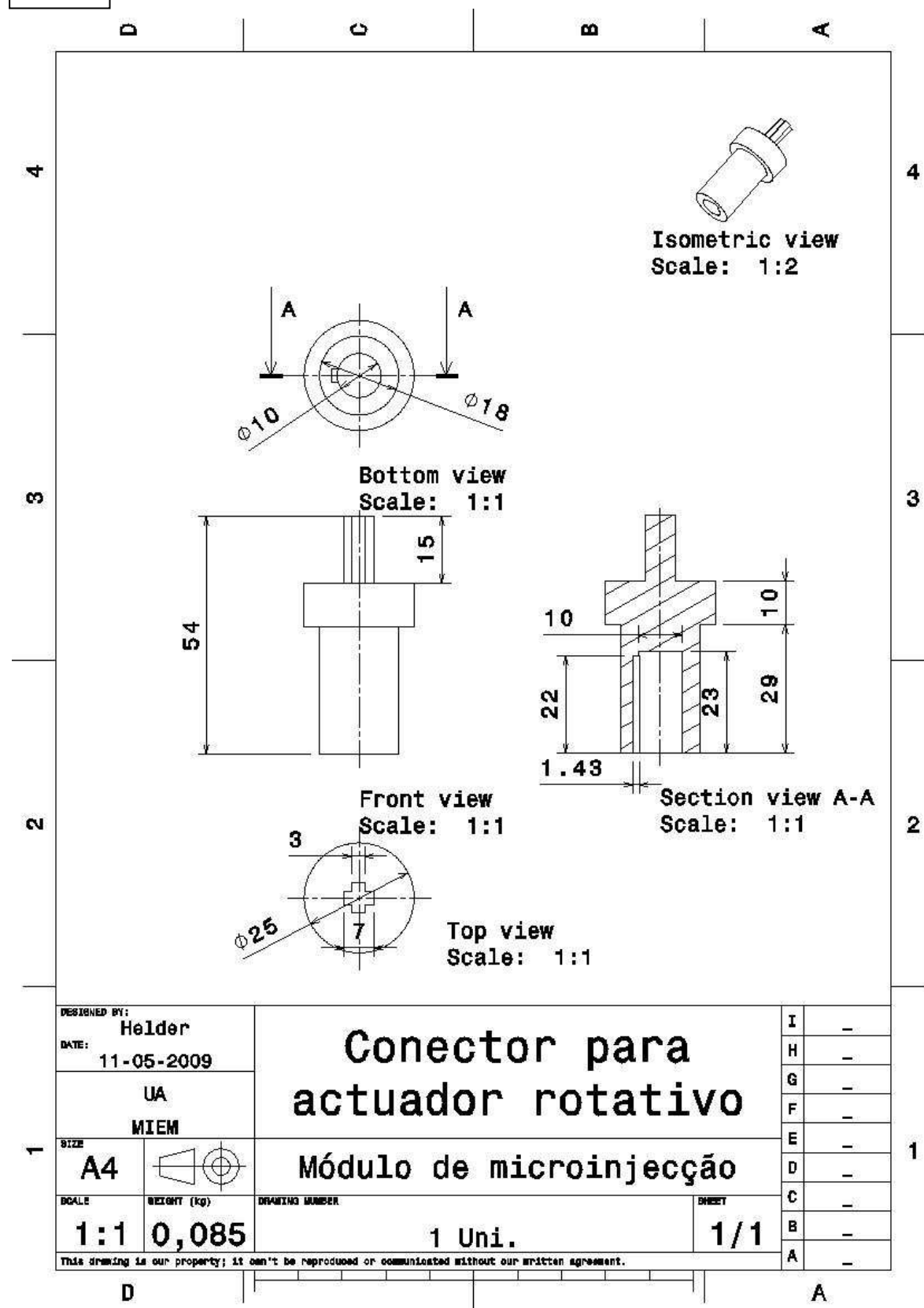
8.2.



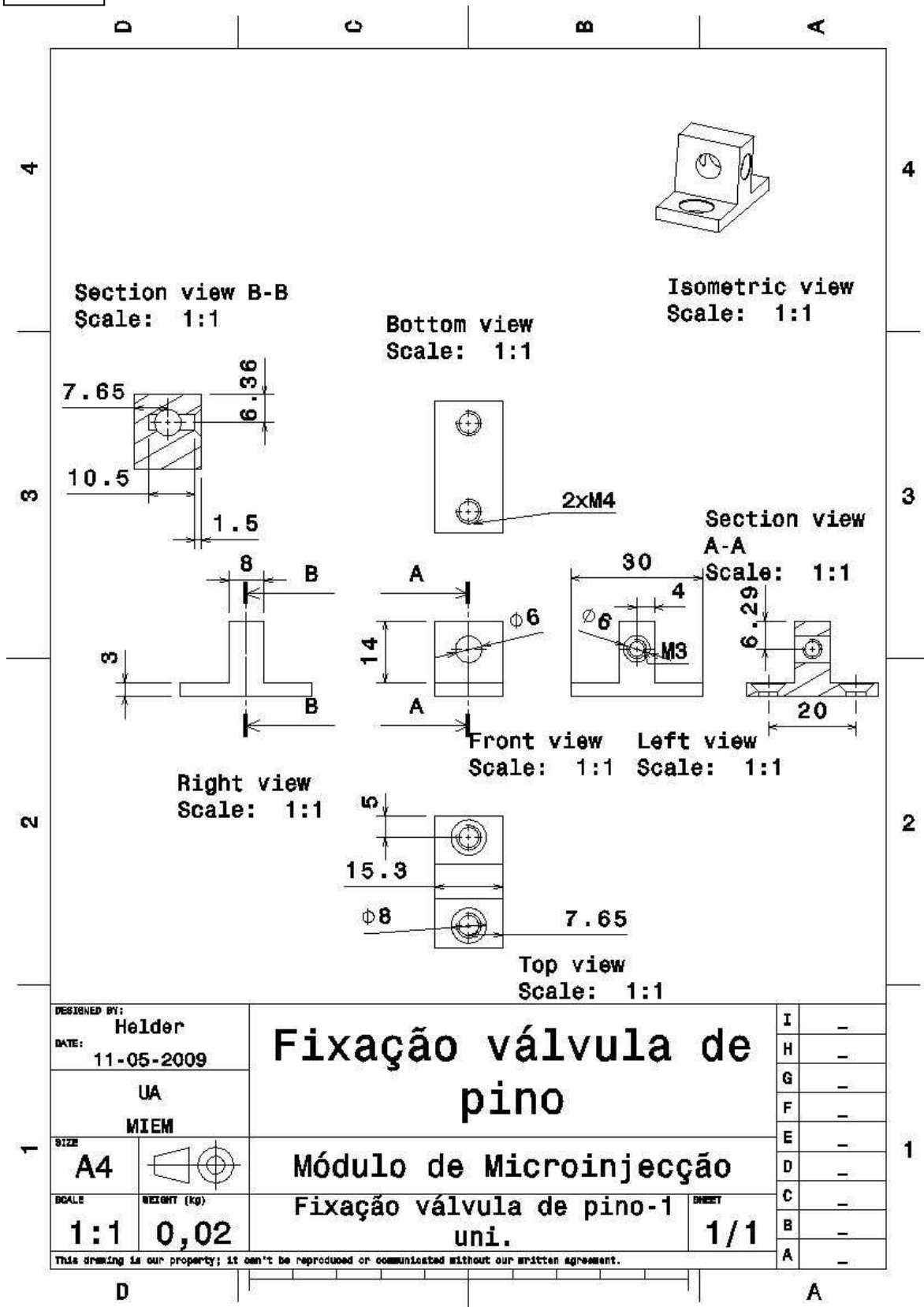
8.3.



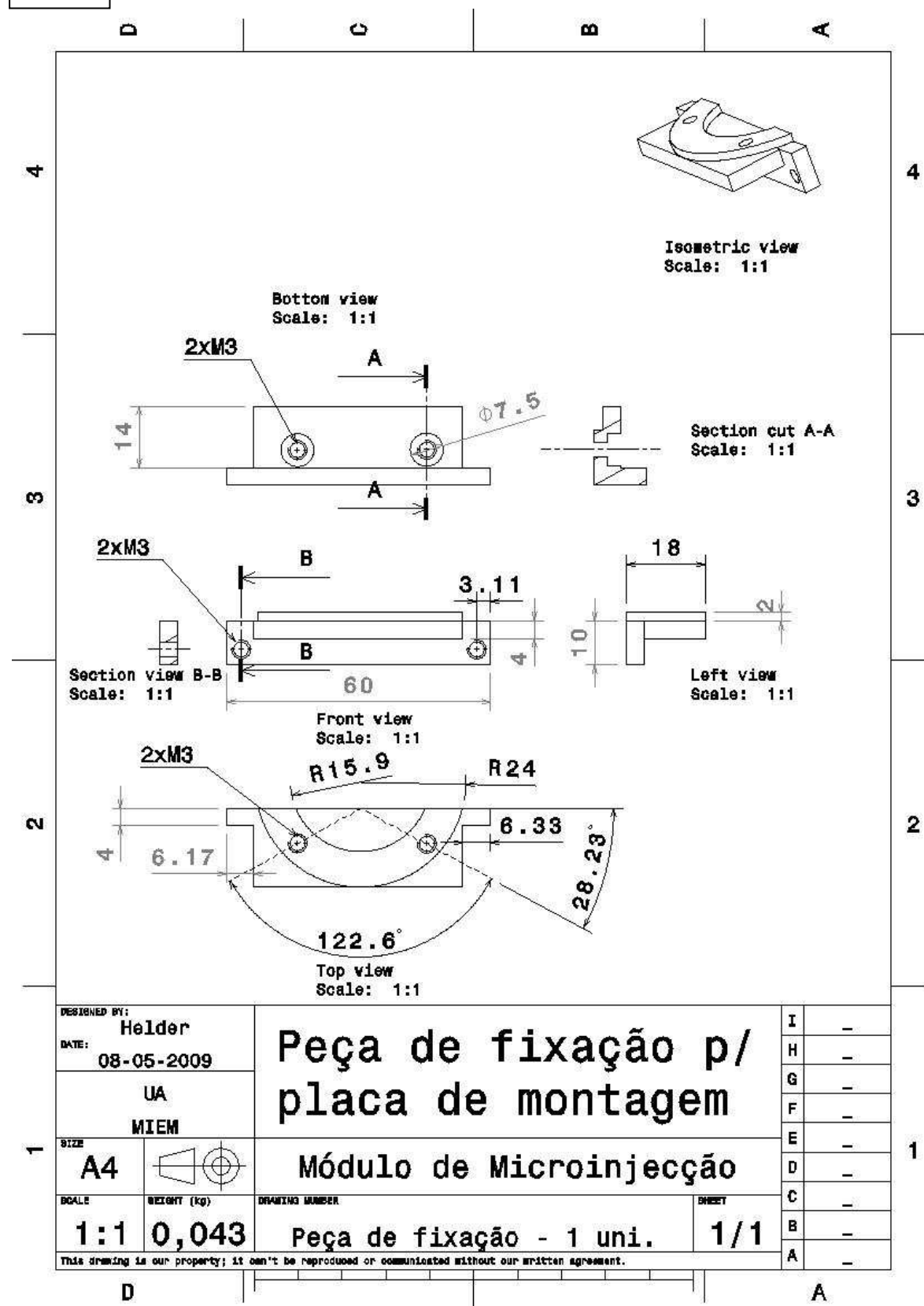
8.4.



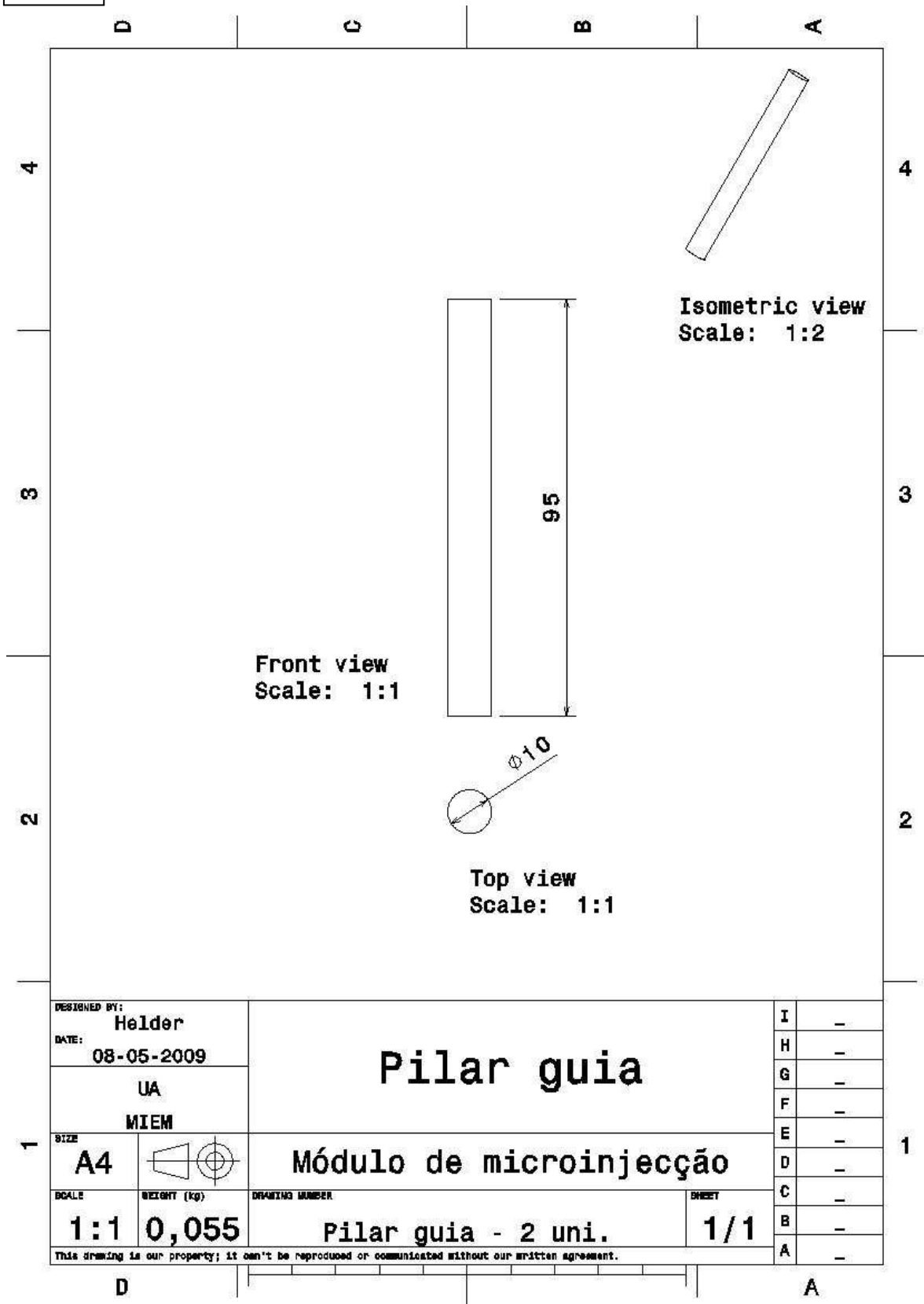
8.5.



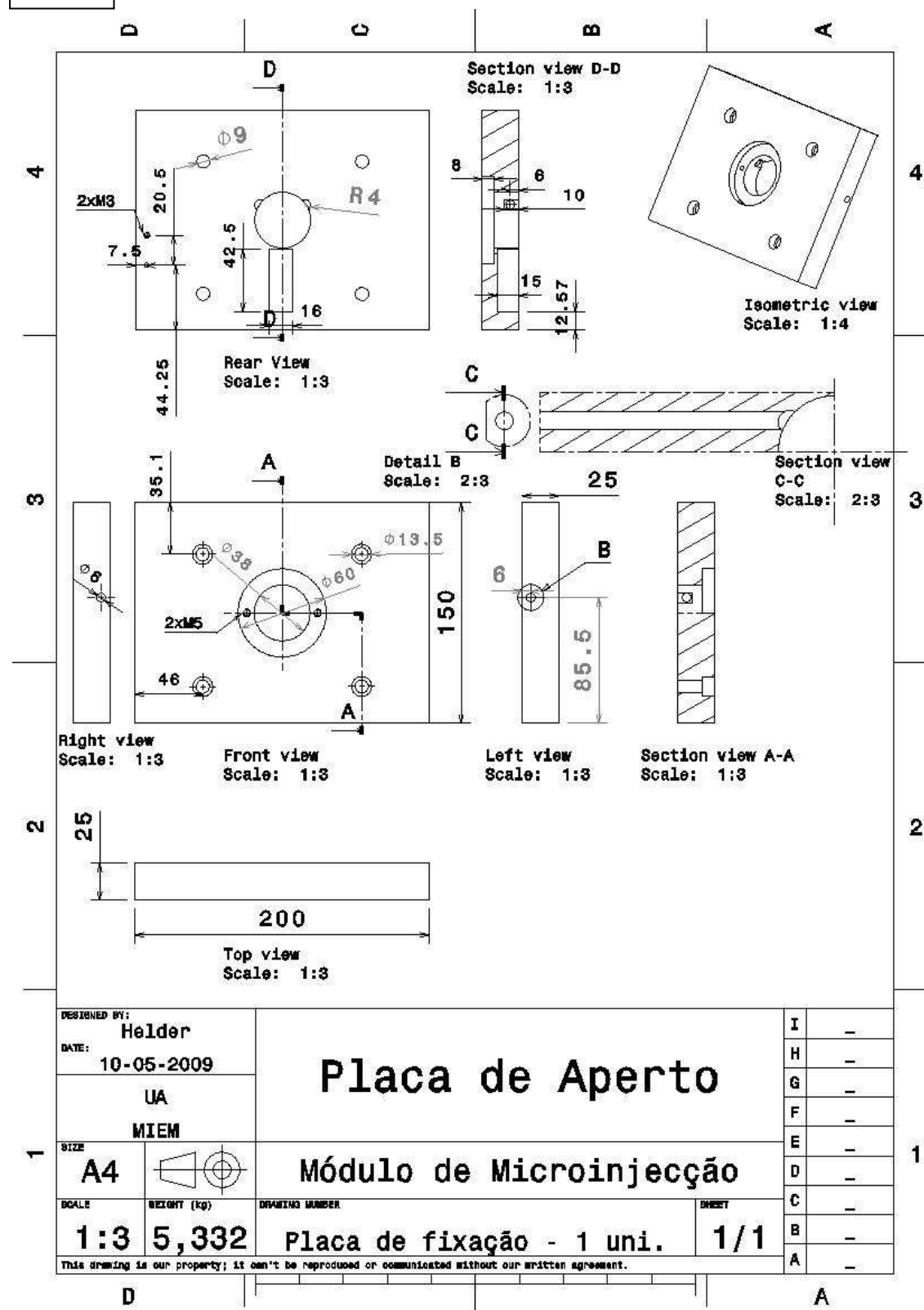
8.6.



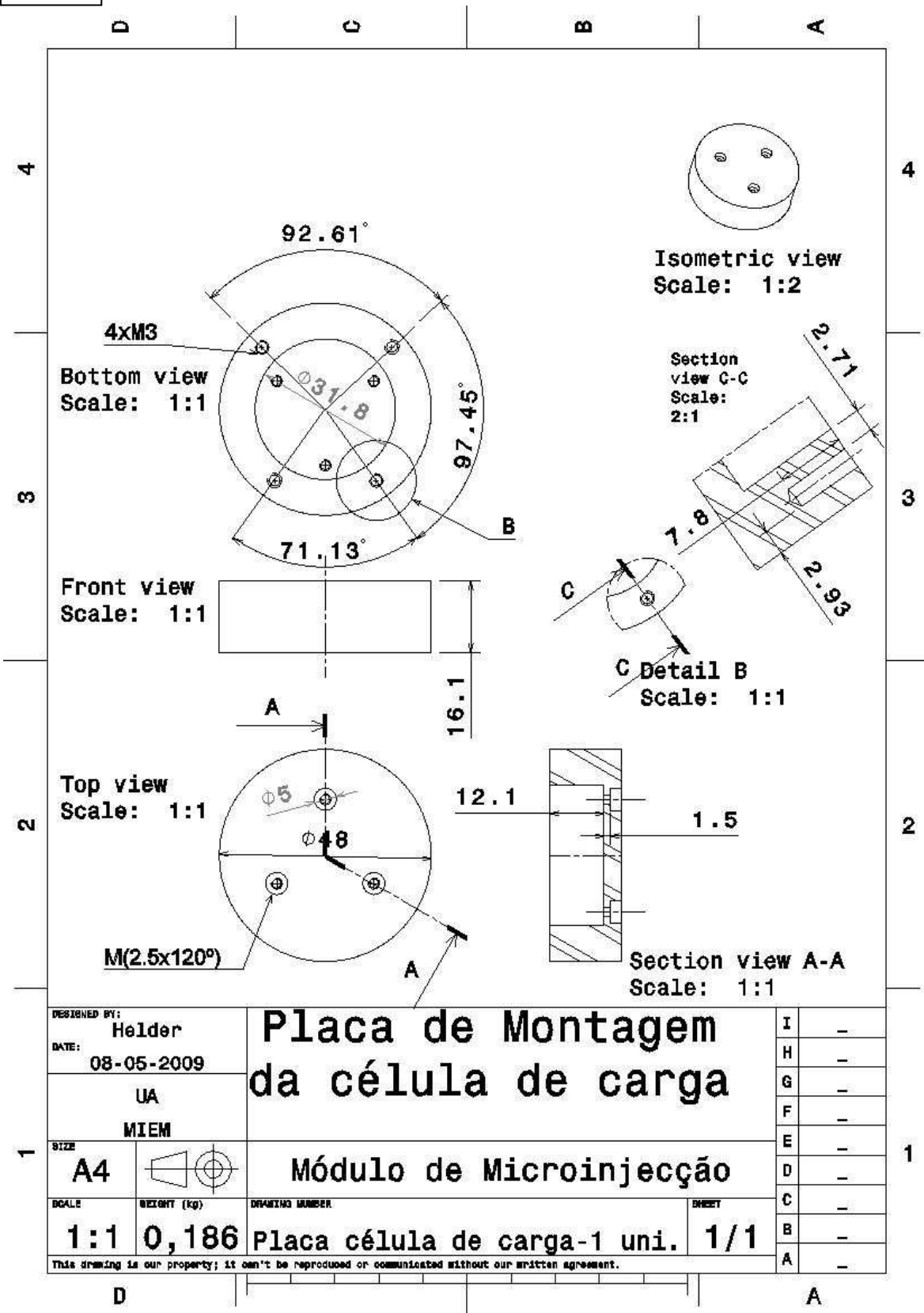
8.7.



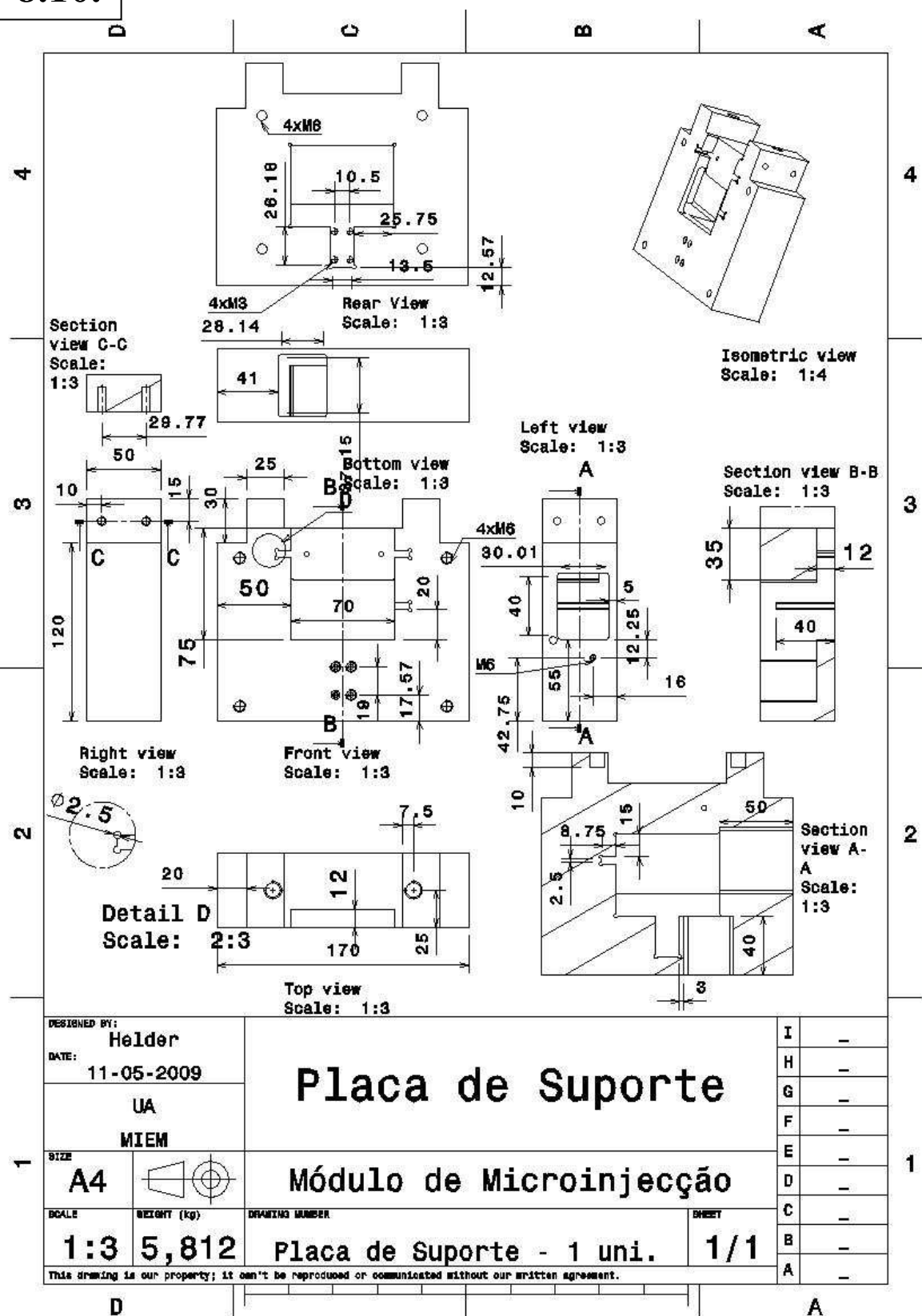
8.8.



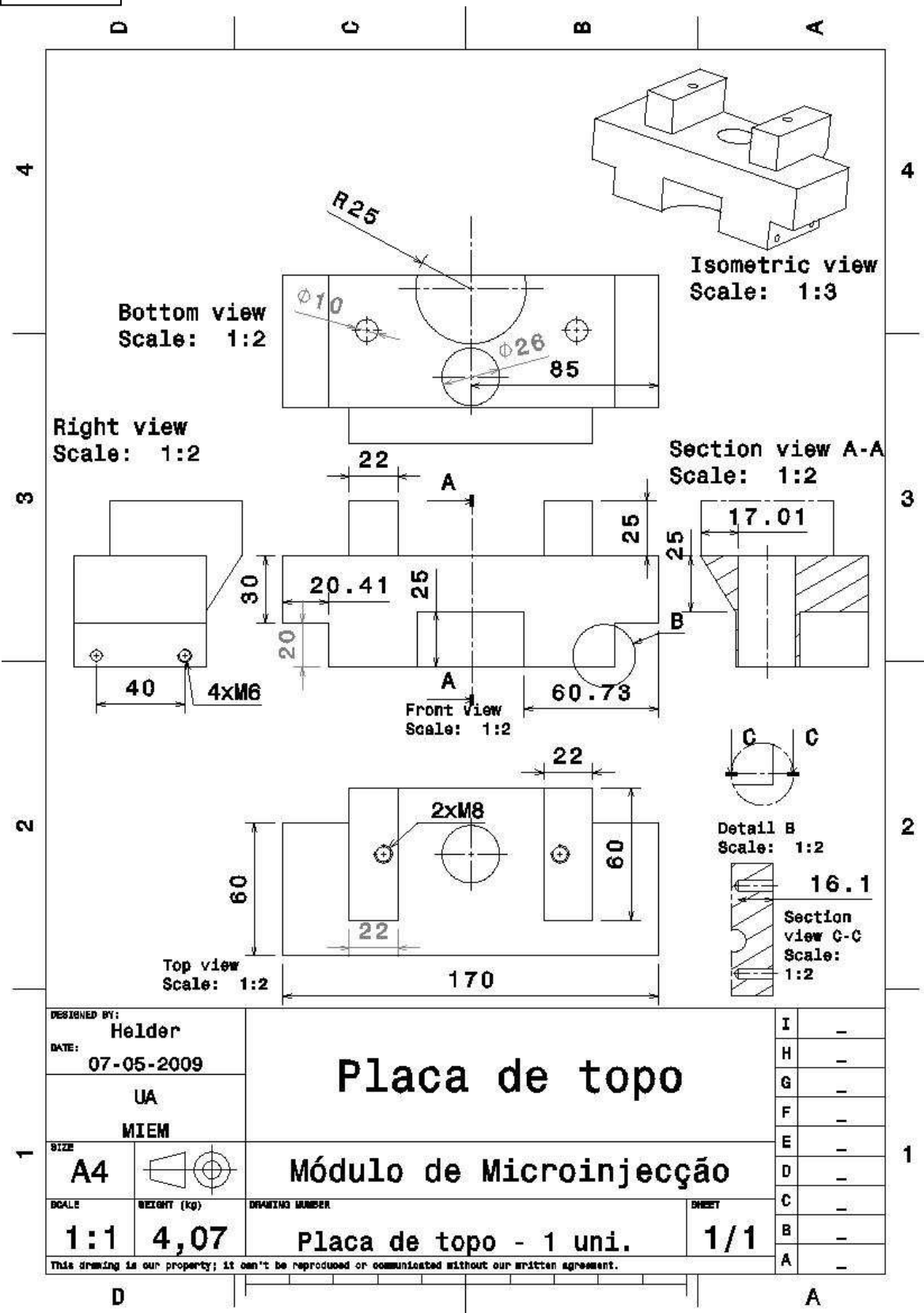
8.9.



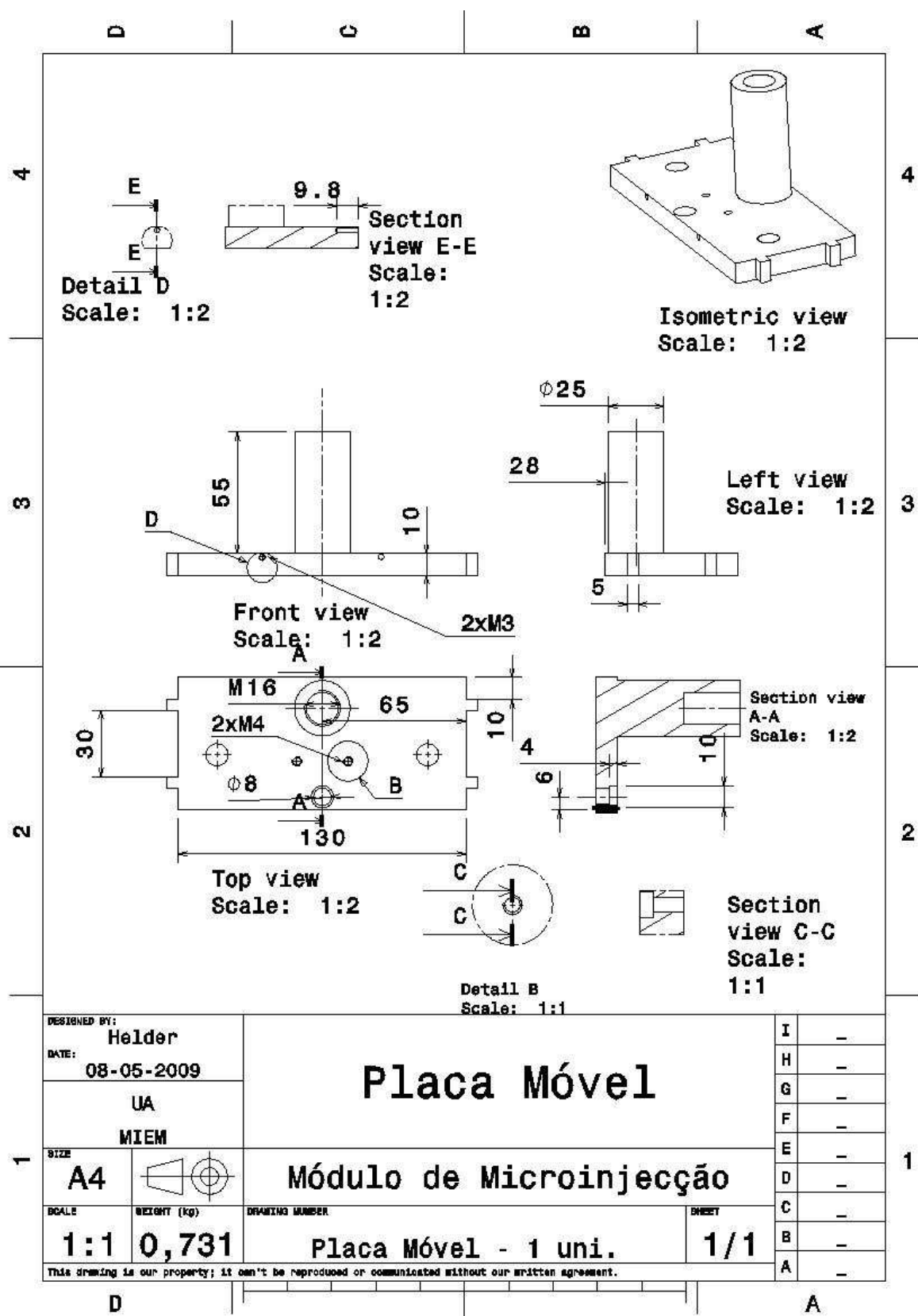
8.10.



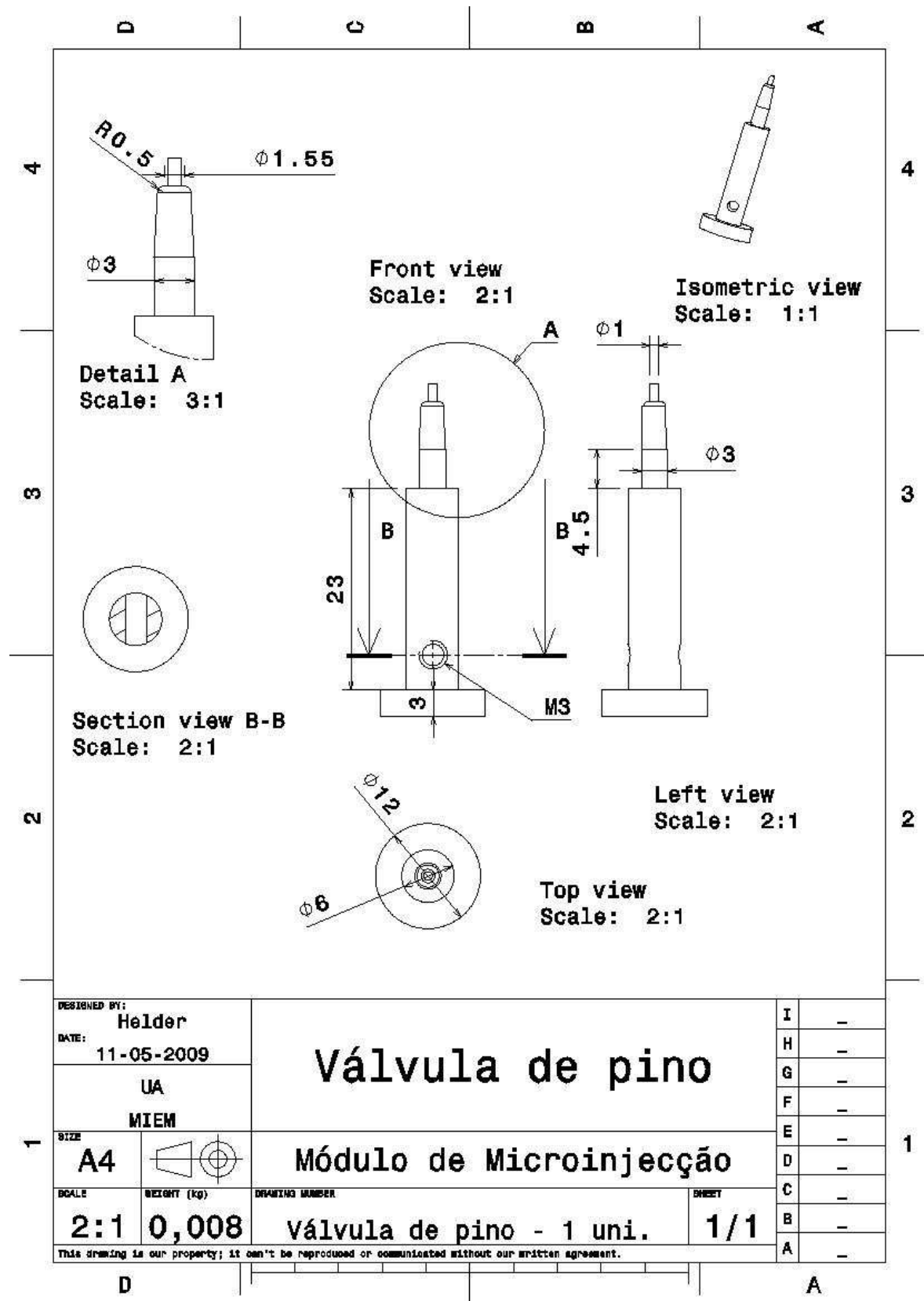
8.11.



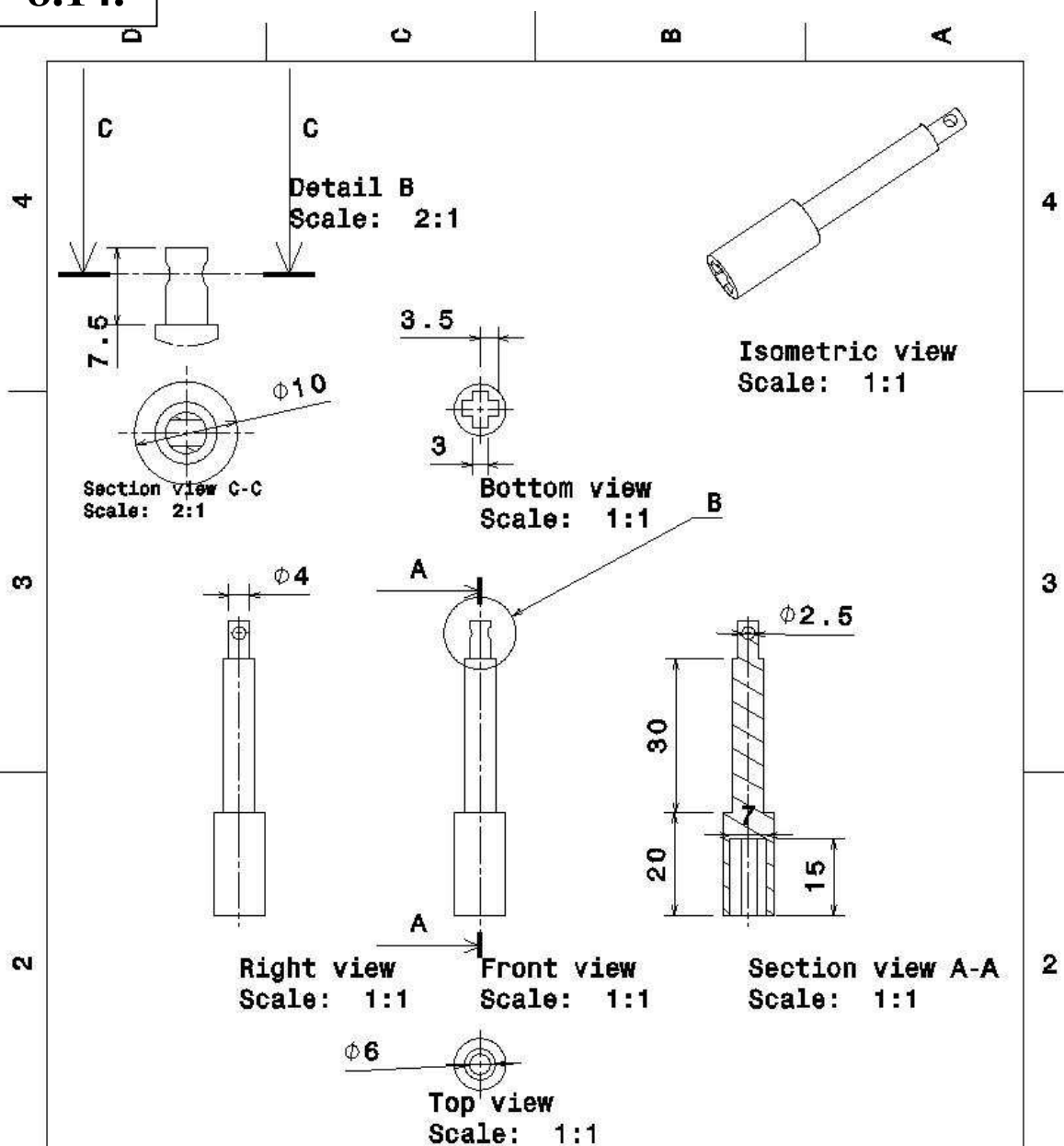
8.12.



8.13.



8.14.



DESIGNED BY: Helder	Válvula rotacional		I	-
DATE: 11-05-2009			H	-
UA			G	-
MIEM	Módulo de Microinjecção		F	-
SIZE A4			E	-
SCALE	WEIGHT (kg)	DRAWING NUMBER	D	-
1:1	0,016	Válvula rotacional - 1 uni.	C	-
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.			B	-
			A	-

8.15.

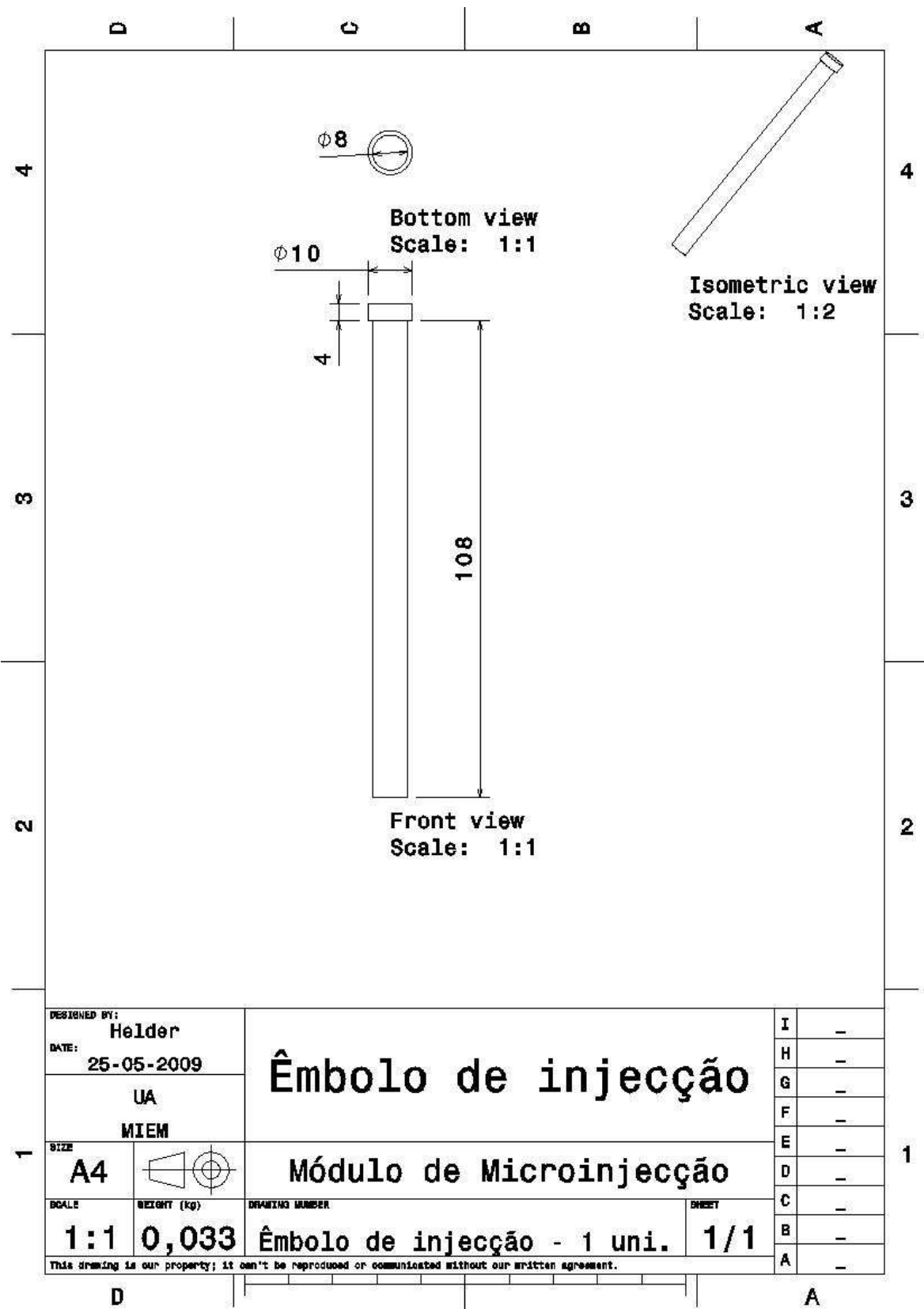




Figura 23: Unidade redutora com material aplicado (1)

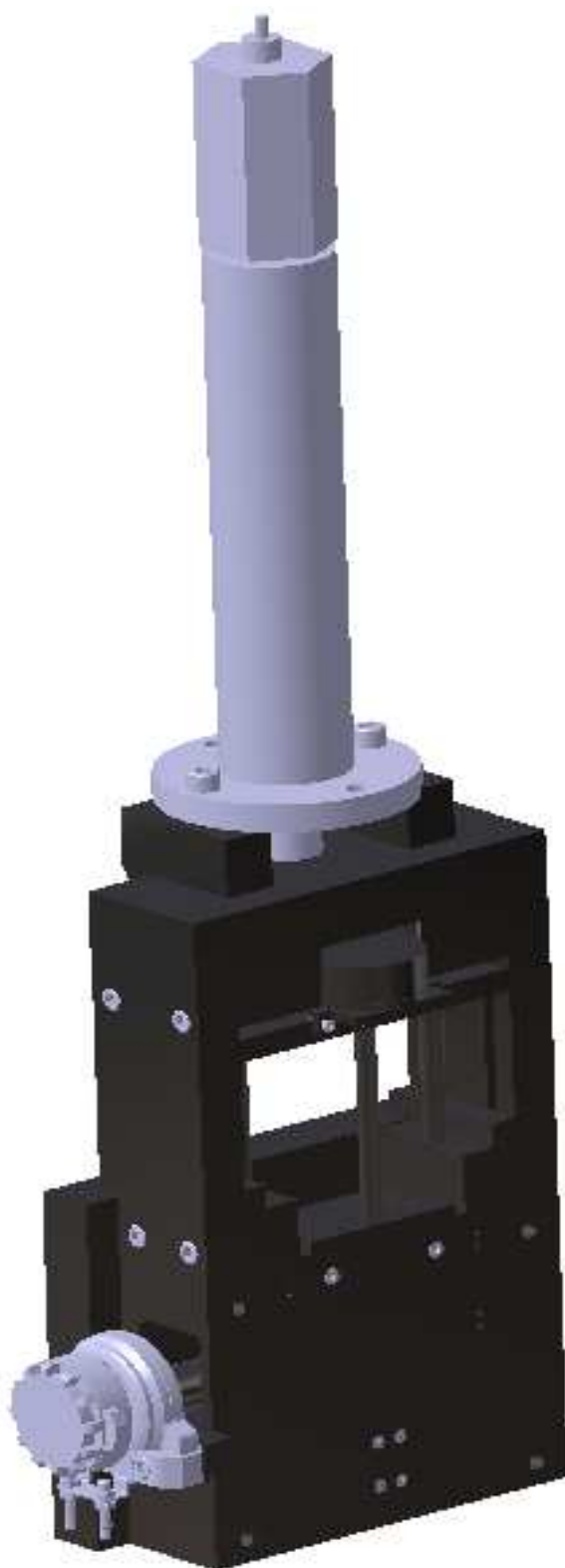


Figura 24: Unidade redutora com material aplicado (2)